

Methoden zur Qualifizierung von CCD-Zeilenkameras als Messgerät für die Farb- und 3D-Messung

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation von Maximilian Klammer (Dipl.-Phys.) aus Überlingen
Tag der Einreichung: 27.06.2017, Tag der Prüfung: 01.11.2017
Darmstadt 2018 — D 17

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Maschinenbau
Institut für Druckmaschinen
und Druckverfahren

Methoden zur Qualifizierung von CCD-Zeilenkameras als Messgerät für die Farb- und 3D-Messung

Genehmigte Dissertation von Maximilian Klammer (Dipl.-Phys.) aus Überlingen

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh

Tag der Einreichung: 27.06.2017

Tag der Prüfung: 01.11.2017

Darmstadt 2018 — D 17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: [urn:nbn:de:tuda-tuprints-72047](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-72047)

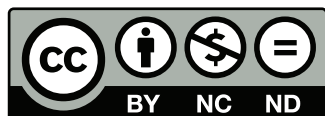
URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/7204>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung – Keine kommerzielle Nutzung – Keine Bearbeitung 4.0 International

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Ich danke der *Chromasens GmbH* und insbesondere der Geschäftsleitung Markus Schnitzlein und Martin Hund, für die Vielzahl von herausfordernden Themen, welche Ich im Rahmen meiner Entwicklungstätigkeiten bearbeiten durfte. Der stetige Antrieb der *Chromasens GmbH* zur Entwicklung von innovativen, marktführenden Produkten inspirierte mich maßgeblich dazu, die vorliegende Arbeit zu verfassen. Herrn Prof.Dr.-Ing Dörsam danke ich sehr für die fachliche Betreuung meiner Arbeit und die motivierenden Gespräche. Weiterhin danke ich meiner wunderbaren Frau Jasmin und unserer Tochter Nahla für die Geduld während der vielen Monate, in welchen meine Dissertation neben den beruflichen Tätigkeiten an vielen Abenden, Wochenenden und im Urlaub entstanden ist. Ich danke außerdem Julia und Anders Landig für die zahlreichen Korrekturen und Hinweise, welche maßgeblich dazu beigetragen haben, der Arbeit den letzten Schliff zu geben. Weiterhin möchte ich den Kollegen der *Chromasens GmbH* und des *Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren* für die hervorragende Zusammenarbeit danken.



Kurzfassung / Abstract

Kamerabasierte Systeme werden in zunehmenden Maße für messtechnische Aufgaben im industriellen Umfeld eingesetzt. Deren Qualifizierung hinsichtlich der Tauglichkeit für die jeweilige Messaufgabe ist ein anspruchsvolles Feld, welches ein ganzheitliches Verständnis der Kamerasysteme voraussetzt. Im Falle kontinuierlich transportierter Objekte eignen sich zur messtechnischen Erfassung insbesondere Zeilenkameras. Der Grund liegt in der hohen optischen Auflösung und der kontinuierlichen Abtastung des Objektes. In dieser Arbeit werden zwei Zeilenkamerasysteme der *Chromasens GmbH* wissenschaftlich untersucht und Methoden zu deren messtechnischen Qualifizierung entwickelt. Betrachtet werden die multispektrale Zeilenkamera *truePIXA*, welche als bildgebendes Farbmessgerät eingesetzt wird, sowie die Stereo-Zeilenkamera *3DPIXA*, welche mittels Triangulation die Vermessung von 3D-Oberflächentopografien ermöglicht. Beide Systeme werden durch mehrere Teilkameras realisiert, die Auswertemethoden sind jedoch komplementär. Der in den Kamerasystemen eingesetzte CCD-Zeilensensor wird angelehnt an den EMVA 1288 Standard charakterisiert, um ein messdatengestütztes Simulationsmodell der multispektralen Zeilenkamera entwickeln zu können. Im nächsten Schritt wird ein Verfahren dargestellt, welches die präzise Vermessung der spektralen Empfindlichkeiten der zwölf Kanäle der multispektralen Zeilenkamera erlaubt. Das Simulationsmodell der multispektralen Zeilenkamera wird eingesetzt, um Sensitivitätsanalysen durchzuführen. Durch den Einsatz eines stochastischen Musters wird die relative Änderung der MTF der Stereo-Zeilenkamera über das Messvolumen charakterisiert. Insbesondere wird der Einfluss der optischen Defokussierung, der Größe des zur Korrelation verwendeten Suchfensters und des Rauschens der Bilddaten auf das Rauschen der 3D-Messung untersucht. Zur Betrachtung der Abhängigkeit der Korrelationsfenstergröße und der Defokussierung, wird der Begriff der frequenzabhängigen Schärfentiefe eingeführt. Dieses Vorgehen führte zu dem Ergebnis, dass das Messrauschen stark von dem Verhältnis der Größe des Korrelationsfensters zur auftretenden Wellenlänge der Modulation im Bild abhängt.

Camera based systems are increasingly used for measurement tasks in the industrial environment. Their technical qualification with respect to the applicability to the targeted metrological application is a challenging field which requires a holistic understanding of such camera systems. In the case of the measurement of continuously moving objects line scan cameras are particularly suitable. The reasons for this are the high optical resolution and the continuous data acquisition. In this work two line scan camera systems of the company *Chromasens GmbH* are detailed analyzed, as well as the necessary methods to implement the technical qualification of their measurement performance are developed. Considered are the multispectral line scan camera *truePIXA*, which is used as imaging colour measuring device, and the stereo line scan camera *3DPIXA*, which deploys triangulation to allow for measurement of 3D-surface topography. The similarity of both systems lies in the implementation using multiple cameras, whereas the data processing methods are complementary. To enable the development of a simulation model of the multispectral line scan camera the used CCD line scan sensor is characterized following the EMVA 1288 standard. Within the next step a method for precise measurement of the spectral responsivity of the twelve channels of the multispectral camera is developed. The simulation model of the multispectral camera system is used to carry out sensitivity analysis. By the use of a random pattern the relative change of the MTF of the stereo line scan camera over the measuring volume is characterized in detail. Particularly the impact of the optical defocus, the size of the correlation window and of the noise of the image data on the noise of the 3D measurement is examined. Within the analysis of the influence of the size of the correlation window and the optical defocus the frequency dependent depth of field is introduced. It is shown that the noise of the 3D-measurement strongly depends on the ratio of the correlation window size with respect to the wavelength of modulation of the image signal.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
2	Grundlagen	19
2.1	Grundlagen des CCD-Zeilensensors	19
2.1.1	Photodiode	19
2.1.2	Der CCD-Zeilensensor	21
2.1.3	Eigenschaften eines Quantendetektors - das Signalrauschen	25
2.1.4	Digitalisierung des Bildsignals	27
2.1.5	Das lineare Kameramodell nach EMVA1288 - die Photontransfermethode	28
2.1.6	Zusammenfassung	30
2.2	Grundlagen der kamerabasierten Farbmessung	31
2.2.1	Menschliche Farbwahrnehmung	31
2.2.2	Farbmessung: Messgeometrien, -Bedingungen und Datenverarbeitung	31
2.2.3	Anzahl der spektralen Kanäle zur Objekterfassung	37
2.2.4	Bestimmung der Mindestanzahl von spektralen Kanälen zur Farbmessung	39
2.2.5	Auslegung der Multispektralkamera zur Farbmessung	41
2.2.6	Lineare Modell zur Berechnung des Kamerasignals	42
2.2.7	Kalibrierung und spektrale Rekonstruktion	44
2.2.8	Zusammenfassung	46
2.3	Grundlagen der stereoskopischen 3D-Messung	47
2.3.1	Aktive und passive Messverfahren	47
2.3.2	Triangulation - das Stereoprinzip	49
2.3.3	MTF - das abbildende Objektiv als analoger 2d-Filter	52
2.3.4	Abbildungsfehler, Rektifizierung und die Epipolargeometrie	55
2.3.5	Algorithmische Verfahren zur Rekonstruktion von Oberflächentopografien	58
2.3.6	Zusammenfassung	60
3	Zielsetzung der Arbeit	63
4	Charakterisierung des Kamerasensors	67
4.1	Experimenteller Aufbau	67
4.2	Linearität	70
4.3	Rauschen	71
4.4	Messdatenbasiertes Sensormodell	74
4.5	Einfluss der Digitalisierung durch die Signaldiskretisierung	75
4.6	Zusammenfassung	77

5	Charakterisierung des zeilenkamerabasierten Farbmesssystems	79
5.1	Messung der spektralen Systemempfindlichkeiten $\Psi_k^s(\lambda)$	79
5.1.1	Experimenteller Aufbau	79
5.1.2	Berechnungen und Normierungen	81
5.1.3	Auswertung der Messdaten	85
5.2	Konsistenztest der gemessenen spektralen Empfindlichkeiten und der Kalibrierung	92
5.3	Universalität der empirischen Kalibrierung	95
5.4	Einfluss von Systemrauschen und Inhomogenität der Messfelder	97
5.5	Simulationsbasierte Systemanalyse	102
5.6	Zusammenfassung	108
6	Charakterisierung des zeilenkamerabasierten 3D-Messsystems	111
6.1	Frequenzabhängige Schärfentiefe	111
6.2	Experimenteller Aufbau	116
6.3	Bestimmung der Änderung der MTF mittels Fouriertransformation	117
6.4	Farblängsfehler, Bildfeldwölbung und Astigmatismus	123
6.5	Messrauschen, Korrelationsfenster und die dominante Objektmodulationsfrequenz	127
6.6	Schärfentiefe als optischer Tiefpass und der Einfluss auf die 3D Oberflächenmessung	128
6.7	Einfluss von Systemrauschen, Korrelationsfenstergröße und Defokussierung auf die 3D-Oberflächenrekonstruktion	132
6.8	Zusammenfassung	135
7	Diskussion	137
8	Zusammenfassung und Ausblick	141
	Literaturverzeichnis	143

Symbolverzeichnis

Physikalische Grundgrößen

h	$= 6.62606957 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	Plancksches Wirkungsquantum
\hbar	$= h/2\pi$	Reduziertes Plancksches Wirkungsquantum
c	$= 299792458 \text{ m/s}$	Vakuumlichtgeschwindigkeit

Symbole und Abkürzungen

Größe	Einheit	Beschreibung
N_x	1	Anzahl von Teilchen, Ereignissen oder Messungen der Bezeichnung x
λ	m	Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung
$\eta = N_q/N_p$	1	Quanteneffizienz der Photonenabsorption
Res	m/Px	Optische Auflösung eines Kamerasystems
D	Px	Disparität - relative Bildverschiebung eines Bildausschnittes zwischen den Teilkameras einer Stereokamera
σ_x	[x]	Standardabweichung der Messgröße x
σ_x^2	[x^2]	Varianz der Messgröße x
t_{int}	s	Integrations- oder Belichtungszeit eines Sensors
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	1	Normspektralwertfunktion; Spektralwertfunktion des CIE-1976 Normalbeobachters
$CIE\text{-}XYZ$		XYZ-CIE-Farbraum
$CIE\text{-}L^*a^*b^*$		CIE- $L^*a^*b^*$ Farbraum
$\Delta E76$	1	Farbfehler als Euklidische Norm im CIE- $L^*a^*b^*$ Farbraum
SNR	1	Signal-Rausch-Verhältnis
K	DN	Systemverstärkung der Kamera
E_o	W/m ²	Optische Bestrahlungsstärke
μ_y	DN	Kamerasignal, Nomenklatur nach EMVA 1288
$\mu_{y.dark}$	DN	Kameradunkelsignal, Nomenklatur nach EMVA 1288

σ_y	DN	Zeitliche Standardabweichung des Kamerasignals, Nomenklatur nach EMVA 1288
σ_d	DN	Zeitliche Standardabweichung des Dunkesignals, Nomenklatur nach EMVA 1288
σ_q	DN	Standardabweichung des Kamerasignals verursacht durch Signalquantisierung, Nomenklatur nach EMVA 1288
$R(\lambda), \tilde{R}$	1	Reflexionsspektrum einer Oberfläche
$S_{CIE}(\lambda)$	W/(nm · m ²)	CIE- Normbeleuchtungsspektrum
$K_{k,i}, \tilde{K}$	DN	Kamerasignal des k-ten Kanals zur i-ten Probe
$\Psi_k(\lambda)$	DN · m ² /(nm · W)	Spektrale Empfindlichkeit des k-ten Kamerakanals
$\Psi_k^s(\lambda)$	DN/nm	Spektrale Systemempfindlichkeit des k-ten Kamerakanals
H		Objektseitige Hauptebene eines optisch abbildenden Systems
H'		Bildseitige Hauptebene eines optisch abbildenden Systems
o	m	Objektweite eines abbildenden optischen Systems, Abstand zwischen Hauptebene H und Objektebene
o_0	m	Referenz-Objektweite mit maximierter MTF zum gegebenem optischen Abbildungsmaßstab
$\Delta o = o - o_0$	m	Änderung der Objektweite zur Referenz-Objektweite o_0
b	m	Bildweite eines abbildenden optischen Systems, Abstand zwischen H' und Bildebene
d	m	Basisabstand eines Stereokamerasystems
$m = b/o$	1	Maßstab einer optischen Abbildung
f	m	Brennweite einer Linse oder eines Objektivs
a	m	Appertur einer Optik
$k = a/f$	1	Blendenzahl
$\lambda_{o,x,y}$	m	Wellenlänge der Modulationen in der Objektebene in x und y Richtung
$\lambda_{b,x,y}$	m	Wellenlänge der Modulationen in der Bildebene in x und y Richtung
$\nu_x, \nu_y = 1/\lambda_{x,y}$	m ⁻¹	Ortsfrequenz
ν_{ny}	m ⁻¹	Nyquistfrequenz
MTF	1	Optische Modulationstransferfunktion
l_{px}	m	Kantenlänge des Sensorpixel
A_{px}	m ²	Fläche des Sensorpixel
u	m	Unschärfekreis
l_F	Px	Kantenlänge des Korrelationsfensters
$B(x, y)$	1	Kontrastfunktion in der Bildebene
$O(x, y)$	1	Kontrastfunktion in der Objektebene

$p_b(x, y)$	1	<i>Punktspreizfunktion in der Bildebene</i>
$p_o(x, y)$	1	<i>Punktspreizfunktion in der Objektebene</i>
DFT		<i>Diskrete Fouriertransformation</i>
DR	1	<i>Dynamischer Bereich einer Messung oder eines Messgerätes</i>

Spezielle Einheiten

Einheit	Beschreibung
lpi	<i>„lines per inch“, im Druck verwendete Einheit für die Frequenz des Druckrasters</i>
dpi	<i>„dots per inch“, im Druck verwendete Einheit für die Frequenz des Druck- oder auch Bildrasters</i>
Px	<i>Einheit für Anzahl Pixel</i>
DN_{xbit}	<i>„Digital Number“, Bezeichnung der dimensionslosen Einheit eines diskreten digitalen Signals mit der Auflösung von x bit</i>
in = 25.4 mm	<i>„Inch“, Längeneinheit des Angloamerikanischen Maßsystems</i>
a.u.	<i>„arbitrary unit“, Beliebige Einheit zur qualitativen Darstellung relativer Änderungen von Größen</i>



1 Einleitung

Die stetig fortschreitende Automation in der produzierenden Industrie verlangt nach immer genaueren und schnelleren Sensorsystemen, die eine Echtzeitregelung in industriellen Produktionsprozessen ermöglichen. Hierbei sind Kraft-, Beschleunigungs-, Druck- und optische Sensorsysteme relevant [Bogue, 2013; Brogårdh, 2007; Dargahi und Najarian, 2005; Blais, 2004; IFRA, 2002; Barbour und Schmidt, 2001].

Der Einsatz von Kameras zur Kontrolle von Prozessen spielt in vielen Anwendungsfeldern eine besondere Rolle [VDMA, 2016; Golnabi und Asadpour, 2007; Malamas u. a., 2003]. Es wird in diesem industriellen Umfeld auch vom maschinellen Sehen („Machine Vision“) gesprochen. Die Bildaufnahme und Verarbeitung ermöglicht es, Objekte optisch zu erfassen, und durch Bildverarbeitung automatisiert auf sichtbare Defekte, wie Kratzer und Farbfehler zu prüfen. Weiterhin werden zunehmend messtechnische Aufgaben auf Basis von Kamerasystemen realisiert [3Dsensation, 2016; Han u. a., 2013; Luhmann, 2010; Sansoni u. a., 2009]. Der zunehmende Einsatz von Kamerasystemen in industriellen, messtechnischen Applikationen motivierte dazu, neuartige Methoden zur Qualifizierung von CCD (*Charge Coupled Device*)-Zeilenkameras als Messgerät für die Farb- und 3D-Messung zu entwickeln, um deren Vorteile und Limitierungen im Detail analysieren zu können.

Applikationen der 3D- und der Farbmessung

Im Bereich der Farbmessung ist in erster Linie als Anwendungsbeispiel die Druckindustrie zu erwähnen, da diese sich historisch gesehen schon seit vielen Jahren mit der Farbkontrolle und Farbregelung beschäftigt, wie die frühe Arbeit von Neugebauer [1937] zeigt. Letzteres hängt damit zusammen, dass gerade im Druck kontrollierbare Prozessparameter zugänglich sind, die direkt die Farbgebung beeinflussen. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um die im Prozess aufgetragene Farbschichtdicke, welche direkt die resultierende Farbe im Vollton- und auch im Rasterdruck bestimmt. Die Kombination der Primärfarben (Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz) werden durch subtraktive Farbmischung angewendet, um innerhalb des abgedeckten Farbraums farbliche Abstufungen gezielt zu erzeugen. Im Prozess muss die Schichtdicke einer jeden Primärfarbe kontrolliert werden, um die Farbgebung absolut zu bestimmen. Der Einsatz von Farbmessgeräten in einer Druckmaschine erlaubt es, den Farbauftrag sehr viel schneller zu regeln, was erhebliche Zeit-, Papier- und somit Kostenersparnisse ermöglicht [Lundström u. a., 2013; ISO12647, 2004; IFRA, 2002]. Doch auch außerhalb der Druckindustrie existieren Produktionsprozesse, die nach einer Farbregelung und somit nach einer Farbmessung verlangen. Hierbei sind beispielhaft Färbungsprozesse der Textilindustrie zu nennen [Herzog und Hill, 2003].

Der visuelle Eindruck von Produkten ist maßgeblicher Faktor bei der subjektiven Bewertung ihrer Qualität. Daher ist es verständlich, dass insbesondere im Falle der Herstellung von hochwertigen Produkten, in die Qualitätssicherung ihrer Färbung investiert wird. Prominente Beispiele hierfür sind der Verpackungsdruck [ISO12647, 2004] und die Herstellung von Kunststoffspritzgussteilen für die Innenausstattung von Automobilen. Neben der Prozessüberwachung und Regelung stellen Sortieraufgaben ein weiteres Applikationsfeld für die Farbmessung dar. Vor allem organische, bzw. natürliche Materialien, welche starke Schwankungen der Färbung aufweisen, müssen vor einer weiteren Verarbeitung hinsichtlich ihrer Farbe sortiert werden [Bianconi u. a., 2013; Misimi u. a., 2007]. Ebenfalls spielt die Farbe eine wichtige Rolle in der Qualitätskontrolle der Lebensmittelindustrie [Wu und Sun, 2013c; Pathare u. a., 2013; Francis, 1995].

Das industrielle Applikationsfeld für Messgeräte, welche die dreidimensionale Oberfläche eines Objektes erfassen, ist unerschöpflich in seiner Vielfalt. Alle formverändernde Herstellungs- und Bearbeitungs-

verfahren (Zerspanen, Schleifen, Gießen, 3D-Druckverfahren,...) [Kaya, 2015; Bračun und Sluga, 2015; Chugui u. a., 2013] verlangen in einem automatisierten Produktionsprozess, oder auch allgemein in der Qualitätssicherung, die Vermessung der dreidimensionalen Oberflächentopografie.

In der produzierenden Industrie werden für viele Messaufgaben im Rahmen der Erfassung der dreidimensionalen Form eines Objektes, bzw. der Erfassung deren Oberflächentopografie, taktile Koordinatenmessmaschinen eingesetzt. Das taktile Messverfahren zeichnet sich durch eine mechanische Antastung der Oberfläche des zu vermessenden Objektes aus. Die Marktakzeptanz und die erreichbare absolute Messgenauigkeit solcher Systeme ist sehr hoch [Moers u. a., 2011; Küng u. a., 2007], da diese schon seit vielen Jahren eingesetzt werden.

Allerdings finden in Applikationen der 3D-Messung immer mehr optische Systeme den Einzug, da diese vielfältige Vorteile bieten: Die optische und somit kontaktlose Messung ist verschleißfrei, nicht invasiv und in den meisten Anwendungsfällen auch schneller als taktile Messverfahren. Aufgrund der höheren Geschwindigkeit eignen sich optische Messverfahren insbesondere für Messungen im Produktionsprozess. Die Messauflösung optischer Sensoren erreicht vergleichbare oder auch bessere Werte als taktile Sensoren [Nouira u. a., 2014]. Zudem können Messunsicherheiten sehr gering gehalten werden (nur wenige Nanometer), was das Messen der Oberflächenrauheit ermöglicht [Quinsat und Tournier, 2012]. Wichtige optische Messmethoden sind die Konfokalmikroskopie [Jordan u. a., 1998; Quinsat und Tournier, 2012; Nouira u. a., 2014], die digitale Holographie [Javidi und Tajahuerce, 2000; Mann u. a., 2005], die Weißlichtinterferometrie [Wyant, 2002; Deck und De Groot, 1994] sowie die Bestimmung der Oberflächentopografie durch die Methode des besten Fokus [Nayar und Nakagawa, 1994].

Weitere relevante Anwendungsfälle für die optische 3D-Messtechnik sind die Leiterplatteninspektion vor und nach der Bauteilbestückung [Szymanski und Stemmer, 2015; Ye u. a., 2000; Loh und Lu, 1999], die Qualitätssicherung in der Lebensmittelindustrie, die Inspektion von mikroskopischen Strukturen im Halbleiterfabrikationsprozess [Li u. a., 2016; Nakazawa und Samara, 2014] sowie makroskopische Messaufgaben im Bereich der öffentlichen Infrastruktur. Wobei im letzten Beispiel Verkehrsstraßen [Pu u. a., 2011], Zugschienen und ganze Züge [Chromasens GmbH, 2015] anhand von Daten der dreidimensionalen Oberflächentopografie inspiziert werden.

Limitierungen konventioneller Punktmessgeräte

In der Regel werden zur Qualitätssicherung von Färbungsprozessen spektrometerbasierte Punktmessgeräte eingesetzt. Problematisch daran ist jedoch, dass diese Punktmessgeräte keinerlei Information über die räumliche Dimension eines Objektes mit sich bringen. Denn, wie der Name schon sagt, können auf diese Art immer nur einzelne Punkte eines Objekts gemessen und folglich auch nur einzelne Punkte ausgewertet werden. Eine repräsentative Auswertung des Produktionsprozesses ist deshalb durch die Punktmessung nicht möglich. Variationen auf der Oberfläche, also auftretende Inhomogenitäten, können somit nicht erfasst werden. Die lokale Messung auf einem einzelnen Punkt führt dazu, dass eine Vielzahl von Proben gemessen werden muss, um einen hinreichenden Messdatensatz für die Maschinenregelung ableiten zu können. Hieraus ergeben sich verlängerte Regelzyklen, welche die Makulatur (Ausschuss im Produktionsprozess) und somit die Produktionskosten erhöhen.

Taktile sowie optische 3D-Punktmessgeräte müssen sequentiell alle zu erfassende Messpunkte anfahren. Eine solche Messung kann daher abhängig von der Anzahl der benötigten Messpunkte mehrere Stunden dauern.

Folgende Limitierungen von Punktsensoren sind zu nennen:

- Hohe Messzeit aufgrund der seriellen Datenerfassung
- Es ist keine schnelle, flächenhafte Vermessung der Objekte möglich
- Aufwendige Verfahren zur Positionierung des Messortes
- Nicht variable Messfläche - Feste Messfeldgröße

Der wesentliche Vorteil der Punktmessung liegt in der geringeren Komplexität. Die Messbedingung eines einzelnen Punktsensors lässt mit hoher Präzision kontrollieren, was zusammengefasst sehr hohe Messgenauigkeiten ermöglicht.

Vorteile von Zeilenakerasystemen für messtechnische Anwendungen

Etablierte Messgeräte und Verfahren im Feld der 3D- und der Farbmessung basieren auf Punktsensoren. Die vollständige Erfassung der Oberfläche eines Objektes durch eine Vielzahl von einzelnen Punktemessungen ist aufgrund des seriellen Verfahrens extrem zeitaufwendig und eignet sich daher nicht für eine 100%-Kontrolle im Produktionsprozess. Punktsensoren ermöglichen daher nur die Prozesskontrolle auf der Grundlage einzelner Stichproben. Diese wesentliche Limitierung ist der ausschlaggebende Faktor für die Farb- und 3D-Messung kamerabasierte Ansätze zu wählen. Die Vorteile der kamerabasierten Messung sind:

- 100%-Kontrolle
- Echtzeitfähigkeit der Analysen zur Prozesskontrolle
- Intelligente Bildverarbeitungsalgorithmen ermöglichen vielseitige Auswertungen
- Bewertung verschiedener Qualitätsmerkmale (3D + 2D-Inspektion) durch ein Kerasystem

Aufgrund der maßgeblichen Vorteile kamerabasierter Messsysteme und dem wachsenden Grad der Automatisierung in der produzierenden Industrie wurde von der *Chromasens GmbH* ein alternativer, auf einer multispektralen Zeilenkamera basierender Ansatz entwickelt, um die vollflächige 100 % Farbin-spektion zu ermöglichen.

Die multispektrale Zeilenkamera verfügt über zwölf spektrale Kanäle, welche in vielen Anwendungsfällen eine absolute Farbmessung ermöglicht. Hierzu muss mittels eines Kalibrierverfahrens auf Basis der zwölf-kanaligen Bilddaten das Reflexionsspektrum der erfassten Farbprobe rechnerisch rekonstruiert werden. Die wesentlichen Vorteile dieses Ansatzes liegen in der vollflächigen Erfassung der Objekte, der Echtzeitfähigkeit bei hohen Transportgeschwindigkeiten und der damit einhergehenden Realisierung zur farbmessenden Erfassung jedes einzelnen Objektes bei hohen Produktionsgeschwindigkeiten. Der zeilenkamerabasierte Ansatz eröffnet die Möglichkeit, auf die stetig wachsenden Funktionalitäten der Bildverarbeitung zurückzugreifen, was eine intelligente und somit hochgradig automatisierte Analyse in der Produktion erlaubt. Frei geformte und beliebig platzierbare Messfelder können anhand der Bilddaten positioniert werden, was mit herkömmlichen Punktsensoren so nicht möglich ist. Außerdem können die Bilddaten für weitere Analysen, wie zum Beispiel die Defektinspektion, verwendet werden, was durch die Vereinigung von mehreren Bewertungsmöglichkeiten an einem Einbauort durch ein geschlossenes System erhebliche Kostenersparnisse mit sich bringt. Die behandelte multispektrale Zeilenkamera wird realisiert durch das Aneinanderreihen von vier Zeilenkeras, welche den selben Bereich des Objektes erfassen. Diese Systemgeometrie legt es nahe, ebenfalls im Rahmen der vorliegenden Arbeit die kamerabasierte 3D-Erfassung durch Triangulation mitzuberücksichtigen. Hierzu wird ein Zeilenkerasystem bestehend aus zwei Teilkeras (Stereokamera) betrachtet.

Einige optische 3D-Messmethoden lassen sich durch den Einsatz von Kerasystemen von einer Punktmessung auf eine flächenhafte Messung erweitern. Keras ermöglichen das Erfassen vieler 3D-Messpunkte innerhalb kürzester Zeit. Außerdem kann, basierend auf Bildverarbeitung, die Auswertung der Topografie des Objektes intelligent gestaltet werden. Eine Übersicht der kamerabasierten Messmethoden ist zu finden in 3Dsensation [2016], Sansoni u. a. [2009], Blais [2004] und Luhmann [2000].

Der Systemansatz der *Chromasens GmbH* basiert auf dem stereoskopischen Prinzip. Dieses wird realisiert durch zwei Farbzeilenkeras, welche aus verschiedenen Betrachtungswinkeln ein und dasselbe Objekt erfassen. Durch die abstandsabhängige relative Verschiebung der Bildinhalte der beiden Teilkeras (Disparität) zueinander, kann mittels Bildverarbeitung (Kreuzkorrelation) die Topografie des erfassten

Objektes rekonstruiert werden. Der behandelte technologische Ansatz der *Chromasens GmbH* zeichnet sich durch den Einsatz von Farbzeilensensoren aus, welche insbesondere in schnellen Produktionsprozessen viele Vorteile bieten. Die Farbbilddaten können weiterhin zusätzlich zur zweidimensionalen Inspektion der Objektoberfläche eingesetzt werden.

Wissenschaftliche und technologische Herausforderungen zeilenakamerabasierter Messsysteme

Der Einsatz einer CCD-Zeilenkamera als messtechnisches Instrument bringt einige systembedingte technische Herausforderungen mit sich, die innerhalb dieser Arbeit betrachtet und im Detail analysiert werden sollen. Die wesentliche Herausforderung liegt in der Erweiterung der Messung von Null (Punktmessung) auf zwei Dimensionen (bildhafte Messung in einer Ebene). Die räumliche und die zeitliche Varianz eines bildgebenden Systems müssen hinreichend stabilisiert und durch geeignete Kalibrierverfahren charakterisiert werden, um den hohen industriellen Standards, welche für Messgeräte gelten, gerecht werden zu können. Der messtechnische Einsatz von Bildsensoren und Kameras verlangt nach einem umfassenden Verständnis der Sensorik und einer weitreichenden Charakterisierung eines solchen Systems, um das optische Design und die Datenverarbeitung so weit optimieren zu können, sodass robuste und verlässliche Messergebnisse abgeleitet werden können. Selbst konventionelle spektrometerbasierte Farbmessgeräte verschiedener Hersteller zeigen eine nicht unwesentliche farbmetrische Abweichung zueinander [Dolezalek und Kraushaar, 2005].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll wissenschaftlich untersucht werden, ob die kamerabasierte Farbmessung hinsichtlich der absoluten Farbwiedergabe mit konventionellen Messgeräten in Konkurrenz treten kann. Hierzu wird ein durch Messdaten gestütztes Simulationsmodell der multispektralen Zeilenkamera entwickelt, welches eingesetzt wird, um eine Sensitivitätsanalyse des Systems durchzuführen. Hierzu werden möglichst präzise Messdaten der spektralen Empfindlichkeiten der zwölf Kanäle der multispektralen Zeilenkamera benötigt. Daher wird deren messtechnische Erfassung im Detail betrachtet. Weiterhin wird die Allgemeingültigkeit der Kalibrierung der multispektralen Zeilenkamera anhand von Messdaten geprüft. Als Ergebnis der Betrachtungen kann vorausgesagt werden, unter welchen Voraussetzungen die multispektrale Zeilenkamera zur absoluten Farbmessung im industriellen Umfeld eingesetzt werden kann.

Für die kamerabasierte 3D-Messung wird wissenschaftlich untersucht, wie sich das Messrauschen der 3D-Messung über das Messvolumen des Systems verhält. Viele Anwendungen der optischen 3D-Messtechnik verlangen nach einer hohen optischen Auflösung, was zwangsweise aufgrund optischer und physikalischer Gesetze zu einer starken Limitierung der Schärfentiefe des Stereo-Kamerasystems führt. Daher ist es insbesondere von Interesse genau zu verstehen, wie sich die über das Messvolumen auftretende optische Defokussierung auf das Messrauschen der durch Korrelation ermittelten Höhendaten auswirkt. Hierzu wird ein Messaufbau und die Datenauswertung entwickelt, um über das Messvolumen des Systems das Messrauschen und die frequenzabhängige Schärfentiefe der Stereo-Zeilenkamera messtechnisch präzise zu charakterisieren. Weiterhin wird betrachtet, wie sich die Größe des zur Korrelation eingesetzten Fensters im Zusammenspiel mit dem Rauschen der Bilddaten und der Defokussierung auf das Messrauschen der 3D-Daten auswirkt. Auf Basis der Analysen wird begründet, dass das maximale Messvolumen nur anhand der auftretenden Textur auf der Oberfläche des zu charakterisierenden Objektes festgelegt werden kann. Der Begriff der frequenzabhängigen Schärfentiefe ermöglicht es, die Abhängigkeit des Messrauschens von der Defokussierung und der Größe des Korrelationsfensters quantitativ zu erfassen.

Die messtechnische Charakterisierung des Zeilensensors wird angelehnt an dem EMVA1288 Standard [EMVA, 2010] durchgeführt. Der Standard umfasst die Auslegung des Messaufbaus sowie die Datenauswertung, welche nach der Photontransfermethode Zugang zu den wesentlichen Eigenschaften eines bildgebenden Sensors liefert.

Die Auswertungen und Betrachtungen der multispektralen Zeilenkamera orientieren sich an den Bedingungen der Norm ISO13655 [2009]. Detaillierte Ausführungen der mathematischen Methoden der

Kalibrierung und der Rekonstruktion der Reflexions-Spektren ist in der Dissertation von Eckhard [2015] zu finden.

Das Rauschen der 3D-Messung wird in Anlehnung an die Empfehlungen von OptAssyst [2016] analysiert. Die Analyse des Messrauschens wird ausgeweitet auf das gesamte Messvolumen, die Variation der Größe des Korrelationsfensters und das Rauschen der eingehenden Bildpaare der beiden Teilkameras. Ein umfassender Überblick über mathematische Methoden, Verfahren und Anwendungen im Feld der kamerabasierten 3D-Messtechnik ist in dem Buch von Luhmann [2010] zu finden.

Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2.1 werden die grundlegenden Eigenschaften des CCD-Zeilensensors behandelt, da dieser das zentrale und gemeinsame Sensor-Element der behandelten multispektralen- und der Stereo-Zeilenkamera ist. In den Kapiteln 2.2 und 2.3 werden die detaillierten Zusammenhänge der zeilenkamerabasierte Farb- und der 3D-Messung aufgearbeitet. Die Gleichartigkeit beider Systeme liegt in der Realisierung durch mehrere Zeilenkameras. Die Messprinzipien ergänzen sich im Sinne der nötigen Methoden zur technischen Qualifizierung, da die Farbmessung auf der Analyse der Amplitude des Bildsignals basiert, wohingegen im Rahmen der passiven Triangulation die geometrische Lage der Bildinformationen betrachtet wird. Zu jedem der Bereiche (Sensorik, Farbmessung, 3D-Messung) schließt im zweiten Teil der Arbeit nach der Formulierung der Zielsetzung in Kapitel 3 die messtechnische Charakterisierung an, wobei insbesondere Methoden zur Qualifizierung im Detail entwickelt und erläutert werden. In Kapitel 4 werden die wesentlichen Eigenschaften des Farbzeilensensors nach dem EMVA 1288 Standard [EMVA, 2010] analysiert. Kapitel 5 umfasst die messtechnische und die simulationsbasierte Analyse des multispektralen Zeilenkamerasystems. Im Anschluss wird in Kapitel 6 der Zusammenhang zwischen der Bildqualität und dem Messrauschen der 3D-Messung hergestellt. Insbesondere wird untersucht, wie die Defokussierung im Zusammenspiel mit weiteren Systemparametern das Messrauschen der 3D-Messung beeinflusst. In Abbildung 1 sind die drei Teilbereiche Sensorik, Farbmessung und die 3D-Messung zusammenfassend dargestellt.

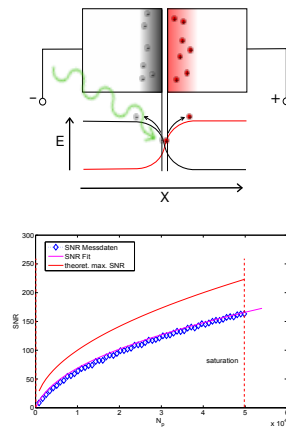
Die Kapitel über die Sensorik (2.1 und 4) umfassen die detaillierte Behandlung des bildgebenden CCD-Zeilensensors. Hierbei wird insbesondere das zeitliche Rauschen des Signals des Zeilensensors behandelt. Das Rauschen des bildgebenden Zeilensensors bestimmt wesentlich das Messrauschen der Farb- und der 3D-Messung und somit unmittelbar die Messunsicherheit des jeweiligen Kamerasystems. Daher muss für die wissenschaftliche Analyse des Messrauschens der zeilenkamerabasierten Farb- und 3D-Messung das zeitliche Rauschen des bildgebenden Zeilensensors umfassend messtechnisch untersucht werden. Die Ergebnisse werden in den Kapiteln über die Farbmessung verwendet, um über ein Simulationsmodell der multispektralen Zeilenkamera Aussagen über den Einfluss des Sensorrauschens auf die Farbmessung treffen zu können. Neben dem Sensorrauschen ist die präzise, messtechnische Erfassung der spektralen Empfindlichkeiten der zwölf Kanäle der multispektralen Zeilenkamera unumgänglich um das Simulationsmodell der multispektralen Zeilenkamera aufstellen zu können. Daher wird eine robuste Methode zur Vermessung der spektralen Empfindlichkeiten entwickelt und angewendet. Das Simulationsmodell wird für umfassende Systemanalysen herangezogen. Die Ergebnisse der Simulationen werden mit aufgenommenen Messdaten verglichen und diskutiert.

Die Kapitel 2.3 und 6, welche die zeilenkamerabasierte 3D-Messung umfassen, fokussieren sich auf die Beschreibung und die präzise Erfassung der optischen Unschärfe, verursacht durch die Defokussierung. Diese Erkenntnisse werden angewendet, um detaillierte messtechnische Untersuchungen des Messrauschens der 3D-Messung über das gesamte Messvolumen der Stereo-Zeilenkamera zu interpretieren. Es werden ebenfalls grundlegende Erkenntnisse aus den Kapiteln 2.1 und 4, welche die Sensorik behandeln, einbezogen. Es zeigt sich, dass das Rauschen der 3D-Messung von einer Vielzahl von Parametern abhängt. Insbesondere spielen hier die optische Defokussierung und die Größe, des zum Vergleich der Bildinhalte verwendeten Suchfensters, wesentliche Rollen und werden daher im Detail untersucht.

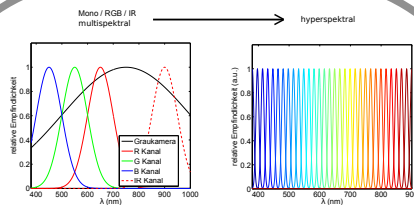
Sensorik

Sensoreigenschaften
(Kapitel 2.1)

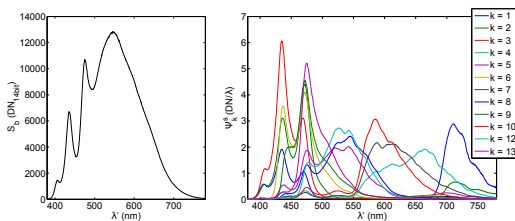
EMVA Sensor
Charakterisierung (Kapitel 4)



Farbmessung

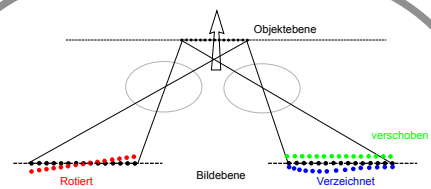


Grundlagen multispektrale
Bilderfassung (Kapitel 2.2)

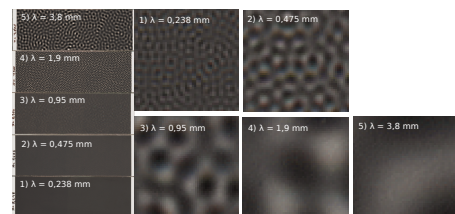


Charakterisierung
& Simulationen (Kapitel 5)

3D-Messung



Grundlagen der
Stereoskopie (Kapitel 2.3)



Schärfentiefe, Korrelation
& Messrauschen (Kapitel 6)

Abbildung 1: Dargestellt sind die drei Teilbereiche der vorliegenden Arbeit. Als Basis für die wissenschaftliche Untersuchung der zeilenkamerabasierten Farb- und 3D-Messung wird der CCD-Zeilensensor behandelt. Alle Teilbereiche umfassen jeweils einen Grundlagenteil und darauffolgende messtechnische Untersuchungen und die Entwicklung der eingesetzten Mess- und Analysemethoden. Im Fall der zeilenkamerabasierten Farbmessung werden zusätzlich Simulationen durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Messfehler auf das System zu untersuchen.

Die multispektrale Zeilenkamera truePIXA



Die Stereo-Zeilenkamera 3DPIXA



Abbildung 2: Auf der linken Seite ist die multispektrale Zeilenkamera truePIXA der *Chromasens GmbH* zu sehen. Auf der rechten Seite ist die Stereo-Zeilenkamera 3DPIXA der *Chromasens GmbH* dargestellt. Diese beiden Kamerateypen werden in der vorliegenden Arbeit wissenschaftlich untersucht [ChromasensGmbH, 2017].



2 Grundlagen

Im Folgenden werden die Grundbegriffe, welche in den drei Teilbereichen der Arbeit benötigt werden, eingeführt. Einleitend werden die wesentlichen Eigenschaften bildgebender Sensoren anhand des EMVA1288 Standards diskutiert. Daran anschließend wird die Farbmessung betrachtet. Hierbei wird insbesondere auf die Problematik einer endlichen Anzahl von spektralen Kanälen eingegangen, da der Einsatz einer multispektralen Kamera zur Farbmessung systembedingt die Anzahl der verfügbaren, spektralen Kanäle limitiert. Als Basis für die messtechnische Behandlung der Stereo-Zeilenkamera werden deren geometrischen und optischen Eigenschaften betrachtet.

2.1 Grundlagen des CCD-Zeilensensors

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden physikalischen Eigenschaften eines Bildsensors beschrieben, da diese maßgeblich die Eigenschaften der darauf basierenden digitalen Kamera und somit des kamerabasierten Messsystems bestimmen.

Der in Halbleiterstrukturen auftretende photoelektrische Effekt [Einstein, 1905] wird in den meisten photosensitiven Sensoren ausgenutzt um Licht zu detektieren, so auch in CCD- (*Charge Coupled Device*) und CMOS- (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) Sensoren (Ausnahmen bilden z.B. thermische Sensoren wie Mikrobolometer). Diese Art von Detektoren zeigt einige grundlegende Eigenschaften, welche in ihren wesentlichen Zügen hier dargestellt werden sollen. Als Beispiel sei das signalabhängige Schrotrauschen (englisch: *shot noise*) genannt, dessen Eigenschaften direkt aus den Eigenschaften des statistischen (Quanten-) Absorptionsprozess abgeleitet werden können. Betrachtet werden muss außerdem der Einfluss durch die Signaldiskretisierung, welcher durch die Digitalisierung des Signals eingeführt wird. Diese wesentlichen Eigenschaften eines Photosensors werden im Rahmen des EMVA 1288 Standards [EMVA, 2010] behandelt, welcher hier als Grundlage für das Systemverständnis dienen soll (Kapitel 2.1.5 und 2.1.3) und auch in Auszügen angewendet wird um den Farbzeilensensor zu charakterisieren (Kapitel 4). Die vollständige Anwendung des EMVA 1288 Standards im Falle der in dieser Arbeit eingesetzten Zeilensensoren wurde von Hollingsworth [2012] ausgearbeitet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird lediglich das Rauschen und die Linearität entsprechend des Standards betrachtet, da diese beiden Einflussgrößen das Verhalten der zeilenkamerabasierten Farb- und 3D-Messung bestimmen.

2.1.1 Photodiode

Herkömmliche Bildsensoren basieren auf einer geometrischen Ansammlung von einzelnen meist mikroskopisch kleinen Photodioden, welche auch Pixel (Wortschöpfung aus dem Englischen *Picture* und *Element*) genannt werden. Unabhängig von der Herstellungs- und Datenerfassungstechnologie (CCD/CMOS) unterliegen diese den Gesetzen des photoelektrischen Absorptionsprozesses, daher soll dieser hier genauer betrachtet werden. Herkömmliche Digitalkameras bestehen im Wesentlichen aus einem Array aus einzelnen Pixeln, wobei jeder für sich genommen als einzelner photosensitiver Sensor arbeitet. Die Gesamtheit der bildgebenden Funktion ergibt sich aus der räumlichen Anordnung der einzelnen Pixel in Verbindung mit einer abbildenden Optik, welche im einfachsten Fall eine Sammellinse sein kann. Diese wird so positioniert, dass das Bild des zu erfassenden Objektes durch die Linse auf dem Sensor optimal fokussiert wird. Um ein digitales Bild als ein messtechnisches Signal vollständig verstehen zu können, muss die Funktionsweise des einzelnen Pixels als die kleinste sensorische Einheit des Systems in seiner grundlegenden Funktionsweise betrachtet werden.

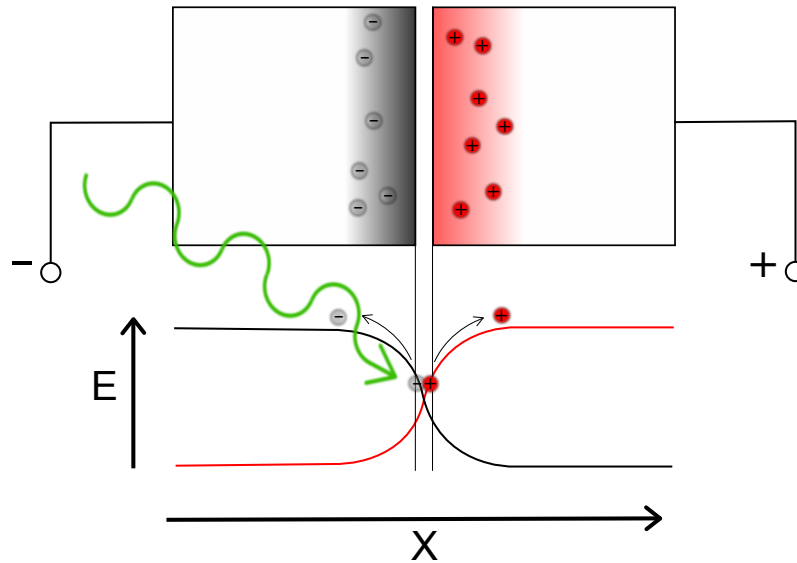


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Absorptionsprozesses anhand der stark vereinfachten Energie-Bänderstruktur in einer pn-Diode; Aufgetragen ist die Energie E über den Ort x im Querschnitt über die Kontaktfläche des n- und des p-dotierten Bereichs der Diode hinweg. Als grüne Welle dargestellt ist das einfallende Photon, welches in der Diode absorbiert wird. Die Energie führt zur Anregung eines freien Elektron-Lochpaares, welches durch die elektrische Vorspannung räumlich getrennt wird um die Rekombinationswahrscheinlichkeit zu reduzieren.

Eine Photodiode ist aufgebaut aus einer n-p-Halbleiterstruktur (n: Dotierung negativer freier Ladungsträger, p: Dotierung positiver freier Ladungsträger). In der Kontaktzone des n- und des p-dotierten Halbleiters bildet sich für die Ladungsträger ein Potentialgefälle aus, welches durch die Energielücke des Halbleiters E_g zwischen Valenz- und Leitungsband sowie durch die Dotierung der beiden Schichten bestimmt wird. Überschreitet die Energie eines einfallenden Photons E_{ph} die Energielücke des Halbleiters $E_{ph} > E_g$, kann das Photon absorbiert werden und über die Bandlücke hinweg ein freies Elektron-Lochpaar generieren. Durch die Diffusionsspannung werden die Ladungsträger mit einer endlichen Wahrscheinlichkeit räumlich getrennt und erzeugen somit eine elektrische Spannung. Die Absorptionswahrscheinlichkeit und somit die Quanteneffizienz der Diode kann mit einer Vorspannung stark vergrößert werden, da sich durch diese eine Ladungsträger-Verarmungszone ausbildet. Durch diese wird die Rekombinationswahrscheinlichkeit stark vermindert und somit wiederum die Absorptionswahrscheinlichkeit bzw. die Quanteneffizienz η erhöht [Demtröder, 2005, Kapitel 14]. In Abbildung 3 ist der Aufbau einer Halbleiter pn-Diode schematisch dargestellt. Die Bandlücke des Halbleiters bestimmt vorrangig über die lineare Dispersionsrelation der elektromagnetischen Strahlung den Wellenlängenbereich, in welchem die Diode Licht absorbiert. Der Zusammenhang der Wellenlänge des Lichtes λ und dessen Energie E_{ph} ist durch die Relation gegeben:

$$E_{ph} = h \cdot \nu = \hbar \cdot \omega = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1)$$

Wobei h das Plancksche Wirkungsquantum ist, und $\hbar = h/2\pi$ gilt. $c = 299792458 \text{ m/s}$ ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Neben der Größe der Bandlücke des Halbleiters hat auch die Dotierung einen maßgeblichen Einfluss auf die Absorption der Diode, da diese die Zustandsdichten im Valenz- und im Leitungsband beeinflusst. Die Faltung der beiden Zustandsdichten ergibt die energieabhängige Absorptionswahrscheinlichkeit, da diese die Summe aller möglichen elektronischen Anregungen beschreibt. Da die Zustandsdichte am Tief- und am Hochpunkt der Dispersionsrelationen am höchsten ist, weisen

direkte Halbleiter eine sehr hohe Quanteneffizienz auf. Hier treffen begünstigend hohe Zustandsdichten im Leitungs- und Valenzband bei identischem Impuls aufeinander. Bei indirekten Halbleitern muss bei der Absorption eines Photons noch ein endlicher Impuls von den Ladungsträgerteilchen aufgenommen oder abgegeben werden. Dieser, mit einer sehr viel geringeren Wahrscheinlichkeit auftretenden Dreiteilchenprozess, impliziert eine geringere Quanteneffizienz.

Silizium stellt das populärste Halbleitermaterial für Photodioden dar, da die indirekte Bandlücke bei Raumtemperatur bei 1.12 eV liegt, was einer Wellenlänge von 1107 nm entspricht. Die Absorption in Silizium erstreckt sich bis zu 300 nm und deckt somit den gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich ab. Der typische Verlauf der wellenlängenabhängigen Quanteneffizienz von Silizium ist in Abbildung 4 dargestellt. Silizium ist in unterschiedlichen Verbindungen und Festkörperstrukturen eines der am ausführlichsten untersuchten Elemente, da es in einer großen Vielzahl von digitalen Schaltelementen eingesetzt wird. Aufgrund der am weitesten entwickelten Prozesstechnologien lassen sich Sensoren auf Siliziumbasis kostengünstig in großen Stückzahlen herstellen. Im nahen Infrarotbereich werden Indium-Gallium-Arsenid Sensoren eingesetzt, da diese den Wellenlängenbereich von 970 nm–1700 nm abdecken [Bass u. a., 2001, Kap. 15]. Weitere Materialien finden ebenfalls Anwendung, jedoch sind für die hier behandelten Anwendungen im sichtbaren Wellenlängenbereich ausschließlich Silizium Sensoren von Interesse.

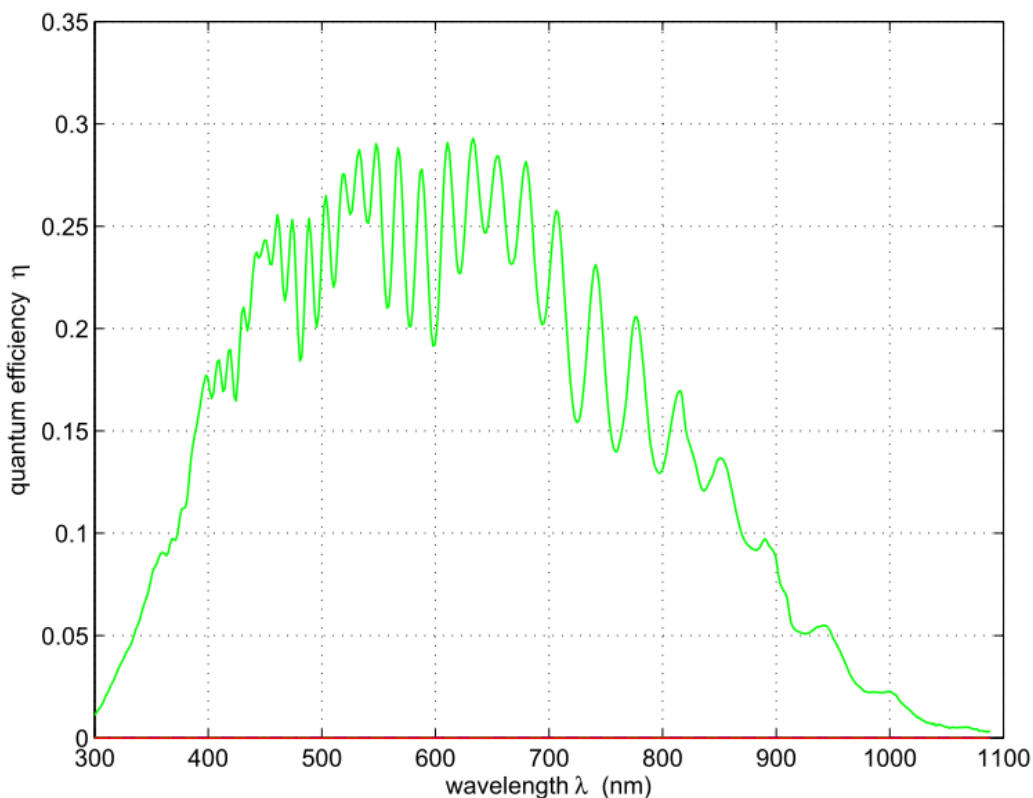


Abbildung 4: Typischer Verlauf der wellenlängenabhängigen Quanteneffizienz einer Silizium Photodiode [EMVA, 2010].

2.1.2 Der CCD-Zeilensensor

Die zwei wesentlichen Sensortechnologien, welche heutzutage zum Einsatz kommen, sind CCD- und CMOS-Sensoren. Der Unterschied zwischen den beiden Technologien besteht darin, dass die Pixel eines CCD-Sensors seriell ausgelesen werden und daher einer starken Limitierung hinsichtlich der maximalen Pixelfrequenz unterliegen, wodurch wiederum die maximale Bildwiederholrate limitiert ist. Bei CCD-

Sensoren werden die Pixel innerhalb eines Halbleiterprozesses hergestellt, die Analog- und Digitalelektronik hingegen ist als eigenes Bauelement vom Sensor entkoppelt. Bei CMOS-Sensoren werden die Pixel sowie die vorverarbeitende Analog- und Digitalelektronik in demselben Prozess und somit auf demselben Substrat hergestellt, wodurch es ermöglicht wird die Pixel und die vorverarbeitende Elektronik auf dem gleichen Bauteil, eben dem Sensor, zu integrieren.

Beide Technologien weisen ihre eigenen Vor- und Nachteile auf. Derzeit werden noch abhängig von der spezifischen Applikation beide Sensortechnologien eingesetzt. Wobei sich in den letzten Jahren der CMOS-Sensor gegenüber dem CCD-Sensor stark durchgesetzt hat [DALSA, 2017, 2011; Theuwissen, 2008; Litwiller, 2001]. Selbst in wissenschaftlichen Anwendungen mit höchsten Anforderungen werden mittlerweile CMOS-Sensoren eingesetzt [Fullerton u. a., 2011]. Die größten Vorteile der CMOS-Sensoren sind deren hohe Auslesegeschwindigkeit und die geringere Leistungsaufnahme. Letzteres ist der wesentliche Grund, warum in mobilen Anwendungen ausschließlich CMOS-Sensoren eingesetzt werden. CCD-Sensoren weisen meistens noch eine bessere Homogenität und Linearität des Signals auf. Weiterhin fällt das Rauschen im Falle von sehr geringem Bildsignal geringer aus. Somit weisen CCD-Sensoren für messtechnische Anwendungen noch einige Vorteile hinsichtlich der Qualität des Bildsignals auf. In dieser Arbeit werden ausschließlich CCD-Sensoren verwendet, daher werden ausschließlich diese näher betrachtet. Neben der Herstellungstechnologie (CCD/CMOS) werden im Falle von Bildsensoren zwei wesentliche räumliche Geometrien unterschieden.

Konventionelle Bildsensoren bestehen aus einer zweidimensionalen quadratischen Anordnung von Pixeln (Matrixsensor, Matrixkamera), welche die Abtastung eines quadratischen Bildfeldes innerhalb einer einzigen Integrationszeit ermöglichen. In diesem Fall entspricht die Anzahl der Pixel in beiden Raumrichtungen direkt der im Bild enthaltenen Auflösung. Alternativ kann mit einer Zeile von Pixeln (Zeilensensor, Zeilenkamera) gearbeitet werden. Das Objekt (oder der Sensor) muss dabei senkrecht zum Zeilensensor bewegt werden, um das Objekt zweidimensional zu erfassen. In Transportrichtung ist die Anzahl der Bildpunkte nicht limitiert. Deshalb können kontinuierlich transportierte Objekte, wie etwa Bahnware, vollständig erfasst werden. Die hier betrachteten Kamerasysteme basieren ausschließlich auf Zeilensensoren, weswegen diese näher erläutert werden.

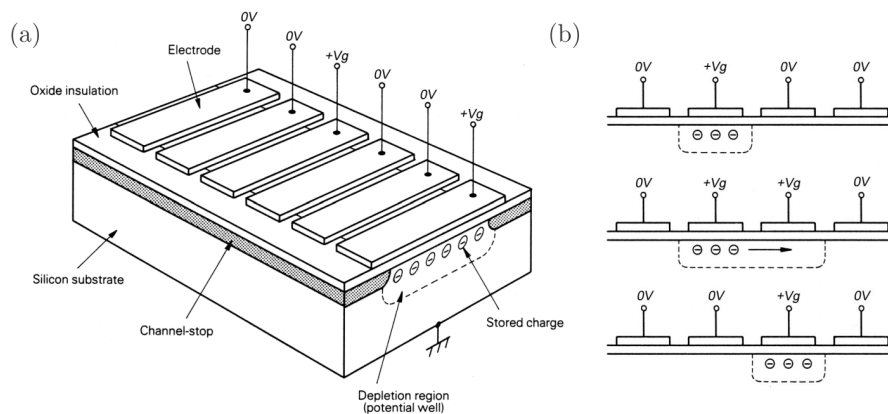


Abbildung 5: Darstellung der wesentlichen Elemente eines CCD-Sensors, welche den kontrollierten Ladungstransport ermöglichen. Oben liegende elektrisch isolierte Elektronen erlauben es schaltbare Potentiale anzulegen, um die Ladung durch den CCD zu transportieren. a) zeigt die geometrische Struktur, b) visualisiert den Schaltprozess des angelegten Potentials [Wal-tham, 2013].

Das Prinzip des CCD-Sensors wurde schon in den 1970er Jahren in den *Bell Laboratories* durch Boyle und Smith [1970, 1974] entwickelt. Seitdem wurden die Sensoren stets optimiert und für verschiedene Applikationen in unterschiedlichen Ausprägungen realisiert. Die Relevanz der Technologie wurde

durch die Zuteilung des Nobelpreis in Physik unterstrichen, den die beiden Erfinder im Jahre 2009 zu je einem Viertel erhalten haben [Boyle, 2010]. Das grundlegende physikalische Prinzip des photoelektrischen Effekts liegt unabhängig von der Herstellungs- und Auslesetechnologie allen auf Halbleitern basierenden Photosensoren zugrunde. Während der Belichtungs- oder auch Integrationszeit t_{int} werden in einem einzelnen Pixel die durch den Absorptionsprozess erzeugten freien Ladungsträger (Elektron-Lochpaare) in der Kapazität der vorgespannten Diode gespeichert, bzw. integriert. Ist die Integrationszeit abgeschlossen beginnt der Transport, bzw. der Ausleseprozess der akkumulierten Ladungen hin zum Strom-Spannungskonverter, dem Analogverstärker und anschließend zum nachfolgenden Analog-Digitalkonverter.

Die Elemente, welche in einem CCD-Sensor den Transportprozess der akkumulierten Ladungen ermöglichen, sind in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Jedes einzelne Pixel des CCD-Sensors ist mit einer isolierten Elektrode versehen, welche es ermöglicht, das Potential jeder einzelnen Zelle über eine angelegte Spannung zu kontrollieren. Durch zeitlich synchronisiertes Anlegen alternierender Spannungen gelingt es eine zeitlich modulierte Potentiallandschaft zu generieren, die die Ladungsträger entlang des CCDs transportiert. Aus dem Prozess des Ladungstransportes ist auch die Namensgebung des Sensortyps zu verstehen, da die einzelnen Elemente einen Austausch der Ladungsträger (*Charge Coupled*) zulassen, was als eine elektrische Austauschkopplung der einzelnen Pixel zu verstehen ist. In den meisten Formen des CCD-Sensors sind die photosensitiven Pixel und die abgedeckten, meist metallisierten Speicherpixel, die für den Ladungstransport zuständig sind, entkoppelt. Prinzipiell ist es auch möglich die photoaktiven Pixel für den Ladungstransport zu verwenden. Allerdings verlangt diese Herangehensweise nach einem mechanischem Verschlussmechanismus (Shutter), da andernfalls während des Ladungstransportes die Pixel weiter belichtet werden. Somit würde das Bild mehrfach belichtet werden, was zu einer unerwünschten Verschmierung der Bildinformationen führt.

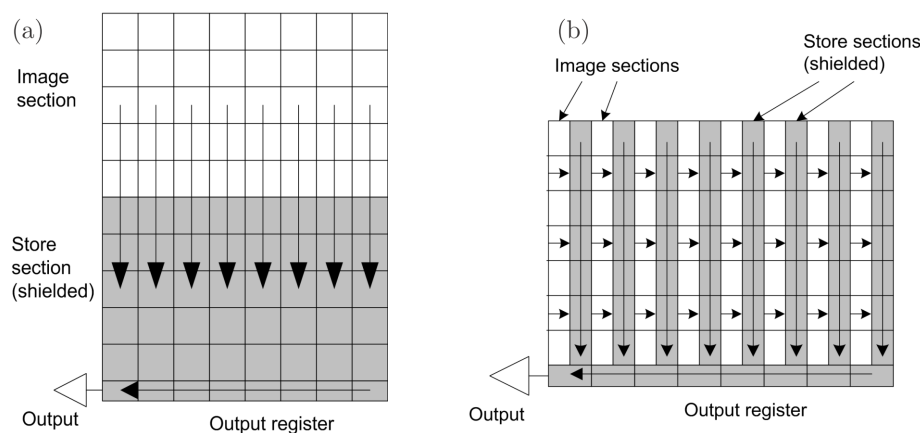


Abbildung 6: Zu sehen sind zwei verschiedene Anordnungen der abgedeckten Speicherpixel [Waltham, 2013]. Grafik a) zeigt das Prinzip des vollständigen Bildtransfers. Hier liegt neben dem photosensitiven Sensor ein zweiter abgedeckter Bereich des Sensors, in welchem nach der Integrationszeit die Ladungen verschoben werden. In b) ist die Interzeilenarchitektur eines CCD-Sensors zu sehen. Neben jeder Spalte photosensitiver Pixel ist eine Spalte Speicherpixel angeordnet. In beiden Fällen werden die Ladungen nach der angeschlossenen Ladungsintegration in den Speicherbereich verschoben.

Im Falle von CCD-Matrixsensoren werden zwei unterschiedliche Geometrien verwendet um die Mehrfachbelichtung schon durch die Sensorauslegung zu vermeiden. In Abbildung 6 sind beide Prinzipien dargestellt. Es kann durch eine Verdoppelung der Sensorgröße nach der Belichtung das komplette Bildsignal in eine zweite Sensorstruktur aus abgedeckten Speicherpixeln der gleichen Größe transferiert werden. Sie fungiert sozusagen als analoger Bildspeicher. Dieser zweite Speichersensor ist durch eine metallische Schicht abgedeckt und dadurch nicht photosensitiv. Aus diesem zweiten Sensorelement kön-

nen die Ladungen sukzessive ausgelesen werden, während die erste Hälfte des Sensors schon wieder belichtet werden kann (siehe Abb. 6 a).

Alternativ können die Pixel für den analogen Zwischenspeicher zeilenweise in den photosensitiven Sensor integriert werden (Abb. 6 b). Prinzipiell ist die Funktionsweise identisch, jedoch wird durch die Integration des Bildspeichers in den Sensor die effektive photosensitive Fläche des Sensors dramatisch verringert, was zu einer geringeren Quanteneffizienz η führt. Letzteres ist dadurch zu erklären, dass zur Bestimmung der Quanteneffizienz nicht nur die photoaktive Fläche der Pixel betrachtet wird, sondern der gesamte Abstand bis zum nächsten Pixel. Es ergibt sich also die effektive Quanteneffizienz aus der gesamten Sensorfläche. Wird der Bereich zur Zwischenspeicherung der Ladungen neben dem eigentlichen Sensor gelegt (siehe Abb. 6 a), wird hingegen der Chip um etwa den Faktor zwei größer. Damit sind die wesentlichen Vor- und Nachteile der beiden Ansätze erläutert.

Besteht an den Sensor die Anforderung das beste Signal- zu Rauschverhältnis (SNR) zu liefern, muss ein zweiter vollständiger Speicherarray vorgesehen werden (wissenschaftliche und messtechnische Applikationen). Ist hingegen das limitierende Platzangebot bestimmend, muss der Speicherarray zeilenweise in den Sensor integriert werden (alltäglicher Gebrauch). Der effektive Verlust an Photonen muss ggf. durch eine längere Belichtungszeit oder durch den Einsatz von Mikrolinsenarrays (zweidimensionale Anordnung von Mikrolinsen) kompensiert werden [Agranov u. a., 2003].

Im Falle von Zeilenkameras verhält es sich anders. Da die in dieser Arbeit eingesetzten Zeilensensoren ohnehin nur für jeden Farbkanal eindimensional sind, fallen die beiden vorher diskutierten Fälle zusammen: Neben jeder Sensorzeile befindet sich eine weitere Speicherzeile, in welche nach der Integrationszeit die komplette Bildinformation der Zeile transferiert wird.

Das Prinzip ist in Abbildung 7 illustriert, exemplarisch ist hier nur eine einzelne Sensorzeile dargestellt. Die Erweiterung auf eine RGB-Farbzeile, wird einfach durch Aneinanderreihung von drei Zeilen erreicht, wobei jede der Zeilen mit dem entsprechenden Farbfilter versehen wird. Die Registrierung der drei RGB-Farbzeilen findet durch einfaches Übereinanderschieben der Farbauszüge in der nachverarbeitenden Software statt.

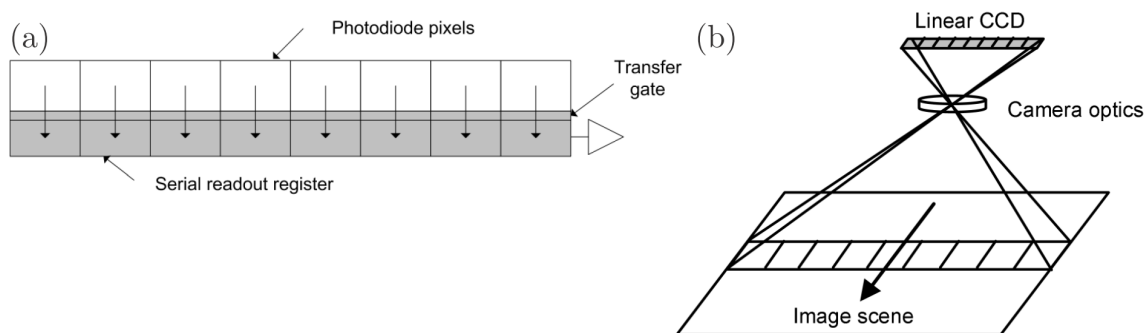


Abbildung 7: Die geometrische Anordnung eines CCD-Zeilensensors ist in (a) dargestellt. Die Speicherpixel sind hier linear neben der photosensitiven Pixelzeile angeordnet. Auf der rechten Seite (b) sieht man das Bildaufnahmeprinzip durch sukzessives Abtasten des Objektes im Scanbetrieb [Waltham, 2013]. Durch die Bewegung des Objektes oder auch des Sensors wird das zweidimensionale Bild zeilenweise erfasst.

Der Einsatz von Zeilensensoren ist aus technischer Perspektive immer dann sinnvoll, wenn ein kontinuierlich bewegtes Objekt mit sehr hoher Auflösung erfasst werden soll. Typische Anwendungen sind Dokumentenscanner, Druckinspektionssysteme und bildgebende Qualitätssicherungssysteme in der Halbleiterindustrie. Hingegen werden Matrixkameras bevorzugt, wenn keine hinreichende Synchronisation der Zeilenrate zum Transport der zu erfassenden Objekte möglich ist. Das gilt zum Beispiel für Objekte im freien Fall, oder bei sich auf dem Transportband bewegenden Schüttgut. Auch bei der Inspektion von schwach selbstleuchtenden Objekten, wie Displays, sind Matrixkameras im Vorteil, da diese während der

Integrationszeit das emittierte Licht der gesamten Fläche integrieren. Der schwerwiegendste Vorteil der Matrixkameras liegt allerdings in den geringeren Kosten. Die Kameras und Sensoren sind aufgrund der deutlich höheren Stückzahlen und der damit einhergehenden größeren Anzahl von Produzenten und Anbietern zu geringeren Preisen erhältlich. Zusätzlich weisen die meisten herkömmlichen Matrixkameras einfachere Schnittstellen (wie z.B. Gig E Vision, USB 3.0) auf, welche die gesamten Systemkosten zusätzlich reduzieren.

2.1.3 Eigenschaften eines Quantendetektors - das Signalrauschen

Jeder bildgebende Sensor ist aus einzelnen photosensitiven Pixeln aufgebaut, wobei die räumliche Anordnung der Gesamtheit das digitale Erfassen eines analogen Bildsignals ermöglicht. Unabhängig vom verwendeten Halbleitermaterial und der Herstellungstechnologie ergeben sich hieraus einige grundlegende Systemeigenschaften, die hier erläutert werden sollen. Ein wesentlicher Charakterzug ist das Verhalten des signalabhängigen zeitlichen Rauschens. Die energetische Quantisierung der elektromagnetischen Strahlung in Photonen schlägt sich hier doppelt nieder. Einerseits muss die Energie des einzelnen Photons E_{ph} (bestimmt durch Gleichung 1) die Energielücke der Bandstruktur des Halbleiters E_g übertreffen, sodass das Photon überhaupt absorbiert werden kann. Also muss gelten $E_{ph} \geq E_g$. Andererseits entspricht der generierte Photostrom den durch ein ganzzahliges Vielfaches der pro Zeiteinheit generierten freien Ladungen \dot{N}_q , welche direkt proportional zum einfallenden Photonenstrom \dot{N}_{ph} ist. Der Proportionalitätsfaktor, der die Absorptionswahrscheinlichkeit für jedes einzelne einfallende Photon angibt ist gegeben durch $\eta(\lambda)$ und wird im technischen Umfeld der Sensoren meist als Quanteneffizienz bezeichnet. Der Photostrom \dot{N}_q ergibt somit aus dem Produkt des einfallenden Photonenstroms \dot{N}_{ph} und der Quanteneffizienz η :

$$\dot{N}_q(\lambda) = \eta(\lambda) \cdot \dot{N}_{ph}(\lambda) \quad (2)$$

Zudem muss die Statistik des Absorptionsprozesses berücksichtigt werden. Denn das Signal wird aus einer Summe von statistisch verteilten Einzelprozessen generiert wird. Zum allgemeinen Verständnis trägt folgendes kurzes Gedankenexperiment bei:

In einem zyklischen Experiment trifft jeweils genau ein Photon der Wellenlänge λ auf eine Photodiode. Wobei bei der betreffenden Wellenlänge der Photonen die Absorptionswahrscheinlichkeit bei 50 % liegt, also $\eta = 0.5$. Da das einzelne Photon seine Energie nicht ohne Weiteres auf zwei Photonen mit der doppelten Wellenlänge verteilen kann (nichtlineare Prozesse finden nur bei sehr hohen Leistungsdichten statt), treten nun bei jedem der Einzelexperimente statistisch mit derselben Wahrscheinlichkeit zwei Ereignisse auf: Entweder wird das Photon absorbiert, oder eben auch nicht. Beide Fälle sind für jedes einzelne Experiment gleich wahrscheinlich. Wenn nun die beschriebene Photodiode in einem übergestellten Experiment verwendet werden soll um ein einfallendes Photon zu messen, ist die Messunsicherheit δM nach jedem einzeltem Telexperiment größer als der echte Messwert M selber:

$$\delta M = 1 \quad (3)$$

Eine hinreichende Annäherung des im Experiment zu bestimmenden Wertes M ist daher erst durch eine Mittelung über $N \gg 1$ Telexperimente möglich. Jedoch wird die Unsicherheit der Messung erst im praktisch nicht erreichbaren Fall $N \rightarrow \infty$ gegen Null gehen.

$$\overline{M}_{N \rightarrow \infty} = M = 0.5 \quad (4)$$

Im Detail sind die Zusammenhänge wie folgt:

Zufallsexperimente, welche sich durch nur zwei mögliche Ausgänge auszeichnen, eben dem 'Gelingen' (Ausgang= 1) und dem 'Misslingen' (Ausgang= 0), werden allgemein als Bernoulli-Experimente bezeichnet. Wenn diese einzelnen Experimente (zeitlich) unabhängig voneinander sind und das Eintreten

eines positiven Ausgangs (1) proportional zum betrachteten (Zeit-) Intervall ist und das betrachtete Intervall klein wird im Vergleich zu der gesamten Verteilung, so lässt sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung durch eine Poissonverteilung beschreiben [Schwabl, 2006], [Lehn und Wegmann, 2006]:

$$w_x = \frac{\bar{x}^x}{x!} e^{-\bar{x}} \quad (5)$$

w_x ist die Wahrscheinlichkeit, dass bei gegebener Verteilung zum Mittelwert aller Ereignisse \bar{x} das Ereignis x eintritt. Es gilt für die Verteilung:

$$\sum_x w_x = 1; \langle x \rangle = \bar{x}; (\sigma_x)^2 = \bar{x} \quad (6)$$

In Worten beschrieben ist die Summe über alle möglichen Ereignisse 1 (Normierung), der Erwartungswert $\langle x \rangle$ ist gleich dem arithmetischen Mittel \bar{x} und als wichtigstes Merkmal gilt, dass die Varianz $(\sigma_x)^2$ identisch zum arithmetischen Mittel der Zufallsvariablen x ist. (σ_x bezeichnet hier die Standardabweichung zur Variablen x .) Der Photonenabsorptionsprozess erfüllt die grundlegenden Eigenschaften:

- Das Verhalten der Absorption lässt sich über das Bernoulli-Experiment beschreiben. Das betreffende Photon kann nur entweder absorbiert oder nicht absorbiert werden. Mischergebnisse lässt der physikalische Prozess nicht zu.
- Die Absorptionswahrscheinlichkeit eines Photons ist unabhängig von vorangegangenen und nachfolgenden (Absorptions-)Ereignissen.
- Die Wahrscheinlichkeit eines Absorptionsergebnisses wächst linear mit der betrachteten Zeitspanne, wenn der Photonenstrom \dot{N}_{ph} (optische Bestrahlungsstärke) konstant gehalten wird.

Somit kann abgeleitet werden, dass die Statistik des gemessenen Signals durch die Poissonverteilung beschrieben werden kann. Es kann daher unabhängig von der genauen Kenntnis des jeweiligen Detektors das Signal zu Rauschverhältnis (SNR : 'Signal to Noise Ratio') bestimmt werden:

$$SNR = \frac{N_q}{\sigma_{N_q}} = \frac{N_q}{\sqrt{N_q}} = \sqrt{N_q} \quad (7)$$

Wobei hier N_q die Anzahl der erzeugten Ladungsträger beschreibt und somit dem Messsignal entspricht. σ_{N_q} ist die Standardabweichung des Signals, beschreibt also somit die Streuung der Messwerte um den Erwartungswert. Der sehr überschaubare Zusammenhang beschreibt, dass das SNR alleinig durch die Anzahl der generierten freien Ladungsträger bestimmt wird. Hier gilt nun:

$$N_q = \int_{t=t_1}^{t_2} \int_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda) \cdot \dot{N}_{ph}(t, \lambda) d\lambda dt \quad (8)$$

Somit kann das intrinsisch gegebene SNR nur durch eine Erhöhung der Quanteneffizienz η oder durch eine Erhöhung des einfallenden Photonenstroms \dot{N}_{ph} verbessert werden. Um das maximale SNR eines Sensors zu ermitteln reicht es daher aus, wenn die Kapazität des Sensors (*full well capacity*) und dessen Dunkelrauschen bekannt ist. Dieses ist als additive, vom Signal unabhängige Komponente des Rauschens mitzubetrachten.

Bei den im weiteren Verlauf der Arbeit verwendeten und charakterisierten Sensoren beträgt die Kapazität $N_q^{max} = 50 \text{ ke}^-$ was somit einem maximalen Signal-Rauschabstand von $SNR = \sqrt{500000} \approx 224$ entspricht. Die Dynamik eines Sensors ist hingegen durch das Rauschen des Dunkelsignals limitiert. Viele Applikationen, wie zum Beispiel die Astronomie, stellen an die Bildsensoren die Anforderungen noch bei sehr geringen Bestrahlungsstärken ein hohes SNR zu liefern, was in diesem Fall durch das Dunkelrauschen limitiert wird. Somit lassen sich zwei Grenzfälle hinsichtlich des Systemrauschens erkennen. Sind hohe Bestrahlungsstärken verfügbar, limitiert das Schrotrauschen (und somit die Kapazität des Sensors) die Messung. Wird hingegen bei sehr geringen Bestrahlungsstärken gearbeitet, dominiert das Dunkelrauschen, welches durch die auslesende Elektronik und thermisch erzeugte Ladungsträger gegeben ist.

2.1.4 Digitalisierung des Bildsignals

Bisher wurde diskutiert, auf welchem Wege mit Bildsensoren Licht detektiert werden kann. Die Bildsensoren generieren aus dem einfallenden Photonenstrom ein analoges Strom- oder auch Spannungssignal. Da jegliche Art von gemessenen Daten auf Computern weiterverarbeitet und gespeichert werden, ist es unumgänglich das analoge Ausgangssignal des verwendeten Sensors zu digitalisieren. Eine Digitalisierung ist nichts anderes als eine Aufteilung eines kontinuierlichen, analogen Signalverlaufs in eine endliche Anzahl von diskreten Signalwerten. Da Prozessoren intern mit binären Datentypen arbeiten, werden Auflösungen digitaler Signale in Potenzen zur Basis 2 abgestuft:

$$\begin{aligned}2^1 &= 2 \rightarrow 1 \text{ bit} \\2^2 &= 4 \rightarrow 4 \text{ bit} \\&\vdots \\2^8 &= 256 \rightarrow 8 \text{ bit} \\&\vdots \\2^{16} &= 65536 \rightarrow 16 \text{ bit}\end{aligned}$$

Wenn der Erhalt der Genauigkeit des Signals an vorderster Stelle steht, gilt es die digitale Auflösung so hoch wie möglich zu wählen. Allerdings muss in vielen Fällen die Anzahl der Bits so gering wie möglich gewählt werden, da ansonsten das auftretende Datenvolumen nicht zu handhaben ist. Denn die Anzahl der verwendeten Bits gehen direkt linear in das nötige Speichervolumen bzw. in die notwendige Bandbreite der Datenschnittstelle ein. Wird ein Signal kontinuierlich abgetastet, muss auch die resultierende Datenrate berücksichtigt werden, da diese oft durch die verwendete digitale Schnittstelle limitiert wird. Somit muss bei der Digitalisierung der Daten ein passender Kompromiss zwischen der erreichbaren Genauigkeit und der auftretenden Datenmenge gefunden werden. Typische Kameras, welche im alltäglichen, privaten Gebrauch Anwendung finden, speichern Farbbilder mit einer Auflösung von 8 bit pro Farbkanal. Im professionellen Fotografiebereich werden die Bilddaten meistens im RAW-Format gespeichert, welches je nach Hersteller und Kamera eine Auflösung von 10-16 bit pro Farbkanal verwendet. Im industriellen Umfeld werden je nach Anwendung Datenformate zwischen 8 und 16 bit eingesetzt. Vereinfacht kann man sagen, dass der Messwert eines jeden einzelnen Pixels nicht genauer als dessen Bitauflösung sein kann. Bezogen auf ein Signal mit einer Auflösung von 8 bit bedeutet das eine relativ geringe Genauigkeit hinsichtlich des gesamten Signalbereichs. Es ergibt sich zur gegebenen digitalen Auflösung der maximale dynamische Bereich DR als Verhältnis zwischen maximalem und minimalem messbaren Signal:

$$DR_{8bit} = \frac{2^8}{1} = 2^8 \quad (9)$$

Ist die Auflösung der Messung durch die Digitalisierung limitiert, ergibt sich der dynamische Bereich direkt aus der Bitauflösung. Somit kann im Falle von 8 Bit nur eine Änderung von ca. 0.4% bezogen auf den gesamten Signalbereich aufgelöst werden. Für viele messtechnische Anwendungen und auch für hochqualitative Farbkonversionen ist diese Genauigkeit nicht hinreichend, weswegen hier mit einer höheren Auflösung gearbeitet werden muss. Allerdings muss wie oben erwähnt auch das Volumen der anfallenden Daten diskutiert werden.

Der in dieser Arbeit verwendete Sensor soll für ein Rechenbeispiel herangezogen werden. Der Sensor verfügt über 7296 Pixel, wobei für jeden der drei Farbkanäle (RGB) die volle Anzahl an Pixel zur Verfügung steht. Der Sensor weist folglich für jeden Kanal die volle Auflösung auf. Somit ist die gesamte Anzahl der Pixel $3 \cdot 7296 \text{ Px} = 21888 \text{ Px}$. Zeilenkameras werden mit hohen Zeilenfrequenzen

betrieben, um bei gegebener Transportgeschwindigkeit des zu erfassenden Objektes in Transportrichtung dieselbe Auflösung wie die optische Auflösung zu erzielen. In einem konkreten Beispiel wird mit 22 kHz gearbeitet. Daher müssen pro Sekunde $21.888 \text{ kPx} \cdot 22 \text{ kZeilen/s} \approx 484 \text{ MPx/s}$ transferiert, verarbeitet, bzw. gespeichert werden. Bei einer Auflösung von 8 bit erhalten wir bei diesem Beispiel schon $484 \text{ MPx/s} \cdot 8 \text{ bit/Px} = 3872 \text{ Mbit/s} \approx 462 \text{ MB/s}$. Also etwa ein halbes Giabyte pro Sekunde. Datenraten dieser Größenordnung können nur über spezielle Datenschnittstellen übertragen werden. Muss in diesem Fall nun aufgrund messtechnischer Anforderungen die Signalauflösung von 8 auf 16 bit erhöht werden, bedeutet das bereits eine Verdoppelung der anfallenden Datenmenge. Dies würde einen schlichten Transfer der Daten jedoch schon erheblich verkompliziert, bzw. verteuert. Daher muss im Detail betrachtet werden, welche Signalauflösung für die jeweilige messtechnische Applikation bei der Digitalisierung angewendet werden muss.

2.1.5 Das lineare Kameramodell nach EMVA1288 - die Photontransfermethode

EMVA ist die Abkürzung für die *European Machine Vision Association*, eine Initiative der Industrie zur Standardisierung von Spezifikationen (*EMVA1288*) und Schnittstellen (*GenICam*) von Kameras für industrielle Anwendungen. Ziel ist es, durch den Standard für Kamerahersteller wie auch für Anwender, eine bessere Vergleichbarkeit der technischen Parameter herzustellen. Des Weiteren soll die vereinheitlichte *GenICam*-Schnittstelle die Integration der Kameras vereinfachen.

Dieses Kapitel bezieht sich auf die einheitliche Spezifikation und Charakterisierung von industriellen Kameras, welche durch den EMVA 1288 Standard [EMVA, 2010] definiert wird. Im Gegensatz zu gewöhnlichen Digitalkameras, wie sie im alltäglichen Gebrauch eingesetzt werden, besteht eine Kamera für den Einsatz im industriellen Umfeld typischerweise ausschließlich aus einem Bildsensor und einer Elektronik, welche die Systemsteuerung, Datenvorverarbeitung und die Kommunikations- und Datenschnittstelle bereitstellt. Die abbildende Optik ist in der Regel nicht Teil der Kamera und wird daher durch den EMVA 1288 Standard nicht berücksichtigt. Betrachtet werden durch den Standard lediglich Sensoreigenschaften, die wichtigsten Beispiele sind:

- die Quanteneffizienz $\eta(\lambda)$
- die Linearität des Signals LE
- Signal-Rausch-Verhältnis SNR
- Inhomogenität des Dunkelsignals $DSNU$
- Inhomogenität der Quanteneffizienz $PRNU$

Die detaillierten Auswertungsverfahren und auch die Darstellung der Ergebnisse in einem Datenblatt werden innerhalb des Standards definiert. In der vorliegenden Arbeit werden nur die Teile des Standards beschrieben und behandelt, welche für die diskutierten Inhalte und weiteren Betrachtungen relevant sind. Hierbei spielen das lineare Kameramodell sowie die Beschreibung der Photontransfermethode die wesentlichen Rollen. Die Photontransfermethode beschreibt die Anwendung des linearen Kameramodells zur Datenanalyse des signalabhängigen Rauschens.

In Abbildung 8 ist eine schematische Darstellung des linearen Kameramodells zu sehen, welches zur Herleitung der relevanten messtechnischen Größen herangezogen wird. Eine Anzahl von Photonen N_p trifft auf das Pixel und wird mit der Quanteneffizienz η absorbiert. Entsprechend der Anzahl absorbierten Photonen wird die Anzahl freier Ladungsträger N_e generiert. Additiv trägt der Dunkelstrom (thermisch generierte, freie Ladungsträger) N_d zum Signal bei. Die lineare Konversion der generierten freien Ladungsträger wird durch die Systemverstärkung K beschrieben. Das Quantisierungsrauschen

ist ein weiterer additiver Anteil, der nach der Systemverstärkung noch zu dem digitalen Signal hinzugefügt werden muss. Aus der Annahme der Linearität des Sensors nach Gleichung 8 lässt sich das Kamerasignal μ_y wie folgt beschreiben [EMVA, 2010, Gleichung 6]:

$$\mu_y = \mu_{y.dark} + K\eta \frac{\lambda A}{hc} E \cdot t_{exp} \quad (10)$$

Wobei $\mu_{y.dark}$ das Dunkelsignal des Sensors, K die Kameraverstärkung, A die Pixelfläche, E die Bestrahlungsstärke, λ die Wellenlänge des einfallenden Lichtes und t_{exp} die Integrationszeit ist.

Zu den oben betrachteten signalabhängigen Schrotrauschen wird noch ein signalunabhängiger additiver Teil mit in das Modell eingebracht. Der signalunabhängige Anteil setzt sich zusammen aus dem Schrotrauschen des Dunkelstroms und einen durch die Elektronik gegebenen Rauschbeitrag, welcher durch das Ausleseverfahren des Sensors, die elektrischen Verstärker und die Digitalisierung verursacht wird. In einem linearen System lassen sich die Varianzen der einzelnen Beiträge zum Gesamtrauschen aufaddieren [EMVA, 2010, Gleichung 9]:

$$\sigma_y^2 = K^2\sigma_d^2 + \sigma_q^2 + K(\mu_y - \mu_{y.dark}) \quad (11)$$

Wobei σ_d^2 die Varianz des Dunkelsignals ist und $\sigma_q^2 = 1/12 \text{ DN}^2$ durch die Digitalisierung bestimmt wird. Der letzte Term beschreibt das Schrotrauschen, welches, wie schon detailliert beschrieben, linear zur Anzahl der erzeugten Ladungsträger und somit auch linear zum Signal $\mu_y - \mu_{y.dark}$ ist (Kapitel 2.1.3). Es wird das Dunkelsignal abgezogen, da das Schrotrauschen nur linear zum dynamischen Anteil des Signals steigt. Des Weiteren ist ein Teil des Dunkelsignals nur durch die verarbeitende Elektronik gegeben. Analog-Digitalwandler arbeiten gewöhnlicherweise nur mit positiven Spannungen, daher wird dessen Eingangssignal auf einen positiven Wert stabilisiert. Somit wird verhindert, dass das Signal, beispielsweise durch thermische Schwankungen, außerhalb des Arbeitsbereichs des Analog-Digitalwandlers gelangt. Dieser zusätzliche additive Anteil muss daher in Gleichung 11 subtrahiert werden.

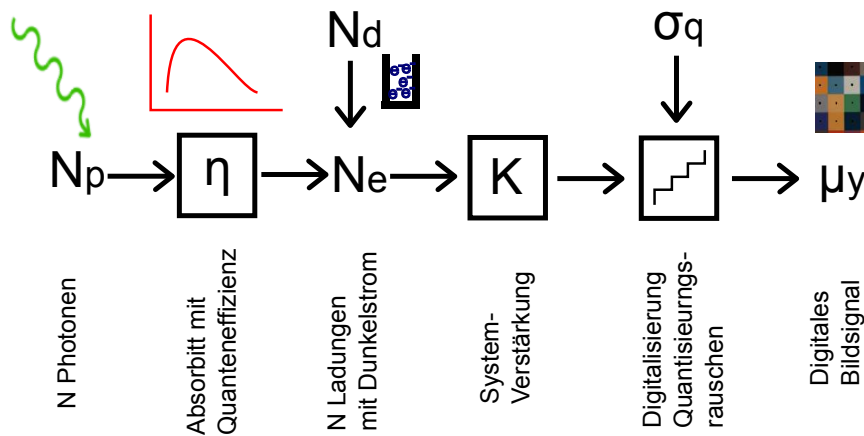


Abbildung 8: Die Grafik zeigt die sequenziellen Abläufe des linearen Kameramodells: N_p Photonen fallen auf das Pixel und werden entsprechend der Quanteneffizienz η absorbiert und durch die Systemverstärkung K und die Digitalisierung in das Bildsignal μ_y gewandelt. Darstellung in Anlehnung an [EMVA, 2010].

Aus diesen Überlegungen heraus kann nun ein messtechnischer Zugang zu relevanten Systemgrößen, wie etwa dem Dunkelrauschen, dem Schrotrauschen, der Quanteneffizienz und zu der Linearität des Systems abgeleitet werden. Um ein definiertes lineares Signal zu generieren, stehen nach Gleichung 10 zwei Möglichkeiten zur Auswahl: Es kann die Bestrahlungsstärke E oder die Integrationszeit t_{exp} kontrolliert moduliert werden, um das Kamerasignal und somit das Rauschen signalabhängig messen zu können. Im Folgenden wird das lineare Kameramodell zur Bewertung des Sensors eingesetzt und aus den Messwerten ein einfaches Modell abgeleitet, welches für weitergehende Simulationen eingesetzt werden kann.

2.1.6 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde einleitend das Prinzip des Photoelektrischen-Absorptionsprozesses behandelt. Dieser beschreibt für alle, auf Halbleiter basierenden Photo-Sensoren, den physikalischen Prozess der Signalgenerierung. Aufbauend auf dem entwickelten Verständnis des quantenmechanischen Absorptionsprozesses wird das Schrotrauschen behandelt. Da in allen digitalen Messsystemen, und somit auch im Falle von Bildsensoren, das analoge Signal zur Weiterverarbeitung oder Speicherung digitalisiert werden muss, wurde das Wechselspiel des Signalrauschens mit der Digitalisierung diskutiert. Weiterhin wurden die grundlegenden Begriffe und Abhängigkeiten der Photontransfermethode nach dem EMVA 1288 Standard dargelegt.

2.2 Grundlagen der kamerabasierten Farbmessung

In diesem Abschnitt werden einleitend die Grundzüge der Farbwahrnehmung und der Farbmetriek dargestellt. Hiervon ausgehend wird diskutiert und analysiert, wie viele spektrale Kanäle ein Messgerät zur Erfassung der absoluten Farbe aufweisen muss. Für eine subjektiv ästhetische Reproduktion von Farben genügen konventionelle RGB-Kamerasysteme (drei spektrale Kanäle). Um jedoch eine messtechnisch absolute Farbwiedergabe zu erzielen, werden meist mehr Informationen benötigt. Folglich müssen für eine höhere Anzahl an Messdaten mehr spektrale Kanäle eingesetzt werden. Grundlegend lässt sich sagen, dass die Anzahl der systemspezifischen Metamere mit einer höheren Anzahl von unabhängigen Kanälen verringert werden kann. In diesem Zusammenhang muss daher betrachtet werden, welche spektralen Eigenschaften das reflektierte oder emittierte Licht aufweist. Es muss also angesichts der messtechnischen Aufgabe betrachtet werden, mit welcher Konfiguration der Kamerakanäle (Anzahl und spektrale Empfindlichkeit) gearbeitet werden kann. Hinsichtlich der Aufgabe der messtechnischen Erfassung des Reflexionsverhaltens von streuenden Oberflächen wird eine Systemkonfiguration ausgearbeitet. Auf Basis des vorgestellten linearen Kameramodells wird ein lineares Verfahren zur absoluten Farbkalibrierung vorgestellt.

2.2.1 Menschliche Farbwahrnehmung

Die Farbwahrnehmung des menschlichen Auges basiert auf drei Rezeptoren, welche in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen des elektromagnetischen Spektrums sensitiv sind, namentlich den S-, M- und L-Zapfen. Verschiedene Experimente wurden durchgeführt, um die wellenlängenabhängigen Normspektralwertkurven der drei Rezeptoren des menschlichen Auges zu vermessen. Hierbei wurden im Wesentlichen von Probanden durch subjektive Farbwahrnehmung eine Gleichheit zwischen einer monochromatischen Farbanregung und einer korrespondierenden Mischung dreier näherungsweise monochromatischen Primärkomponenten hergestellt [Wright, 1930; Guild, 1932]. Aus diesen Experimenten wurden die \bar{x} , \bar{y} und \bar{z} Normspektralwertkurven des nach dem CIE System von 1931 normierten Normalbeobachters abgeleitet [Wright, 1930; CIE, 1932] (siehe Abbildung 9). Später wurden durch weitere Experimente, bei welchen das Gesichtsfeld bei der Messung von 2° auf 10° erhöht wurde die Messung wiederholt. Hieraus leiten sich die Daten der Normspektralwertkurven \bar{x}_{10} , \bar{y}_{10} und \bar{z}_{10} nach dem CIE System des Jahres 1964 ab ([Schanda, 2007] und enthaltene Referenzen). Diese Experimente belegen, dass die menschliche Farbwahrnehmung auf einem Rezeptorsystem mit drei Freiheitsgraden basiert. Darin ist begründet, warum eine geeignete Farbkamera wiederum ebenfalls über drei unabhängige Kanäle verfügen muss, um eine Reproduktion (Druck oder Farbd Displays) der Bildinformationen zu erlauben, welche dem menschlichen Sehapparat gerecht wird. Eine Farb-Kamera, deren spektralen Empfindlichkeiten der drei Kanäle exakt den Normspektralwertkurven des Normalbeobachters entsprechen, ist prinzipiell geeignet, um eine absolute messtechnische Farberfassung zu ermöglichen. Der Raum der Metamere des erfassenden, bzw. des farbmessenden Systems wäre in einer solchen Konfiguration identisch zu den Metameren des menschlichen Beobachters. Farben, die das Messsystem nicht unterscheiden kann, können somit auch durch den Beobachter (bei spektral identischer Beleuchtung) nicht unterschieden werden.

2.2.2 Farbmessung: Messgeometrien, -Bedingungen und Datenverarbeitung

Gewöhnliche Objektoberflächen zeigen im allgemeinen Fall äußerst komplexe optische Reflexionseigenschaften. So trägt eine Vielzahl von Effekten dazu bei, deren Summe zu einer Streuung der einfallenden Lichtleistung über den kompletten Raumwinkel führt. Die polarisationsabhängige Transmission und Reflexion einer elektromagnetischen Welle an einer ebenen Grenzschicht zweier optischer Medien mit verschiedenen Brechungsindizes wird durch die Fresnelschen Formeln [Jähne, 2012, Kap. 2.5] beschrieben. Somit ist die Reflexion, welche in der Regel durch ein Farbmessgerät erfasst werden soll, schon

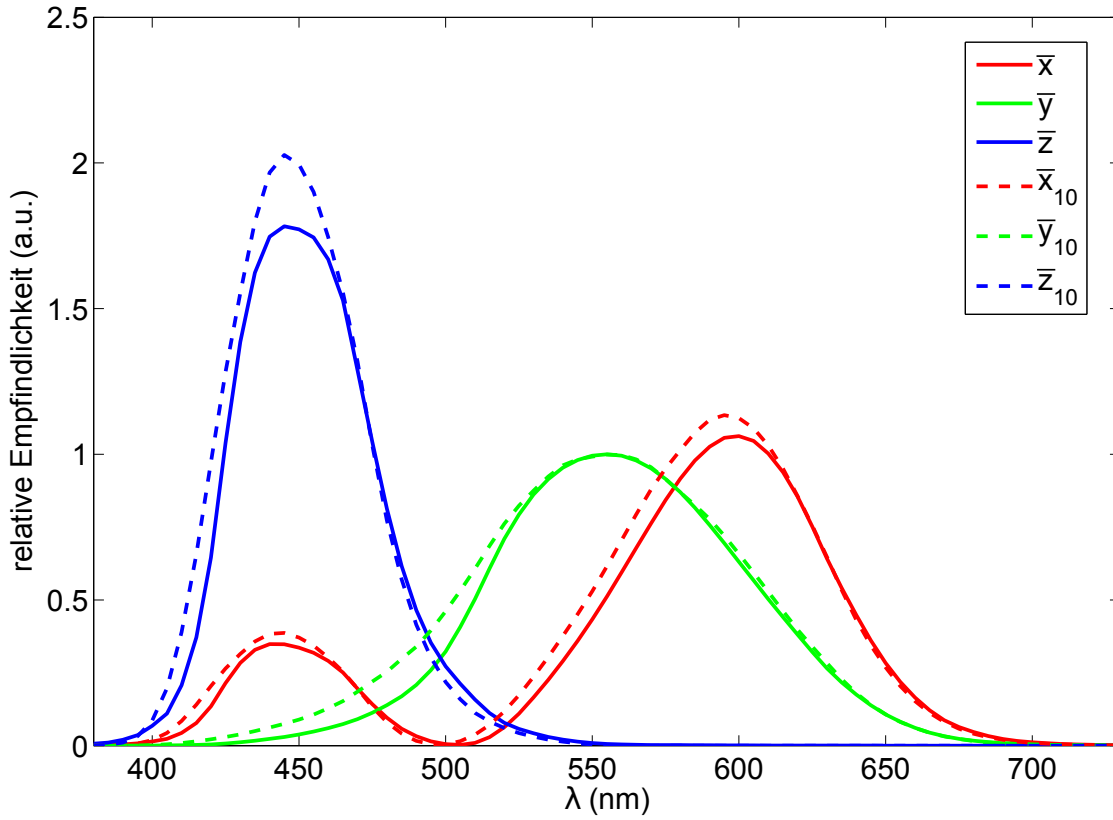


Abbildung 9: Dargestellt sind die Normspektralwertkurven \bar{x} \bar{y} \bar{z} unter 2° und \bar{x}_{10} \bar{y}_{10} \bar{z}_{10} unter 10° Sichtfeld nach den Systemen CIE 1931 und CIE 1964 [CIE, 2016].

im einfachsten Fall vom Einfallswinkel α_e , dem Polarisationsvektor \vec{p} und dem komplexen Brechungsindex $n + ik$ der beteiligten optischen Medien abhängig. Der Brechungsindex hängt wiederum von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes λ ab. Die Fresnelschen Gleichungen beschreiben allerdings nur die Effekte erster Ordnung, gemeint ist hier die Reflexion und die Transmission an der ersten Grenzschicht. Eine wesentliche Komplexität wird durch die Rauheit, bzw. die Unebenheit der Probenoberfläche eingebracht. Somit trifft die einfallende Lichtwelle nicht mit einem definierten Winkel auf die Objektoberfläche, sondern entsprechend der Oberflächentopografie ergibt sich über eine betrachtete Messfläche eine Winkelverteilung, welche nur bei genauer Kenntnis der Oberflächentopografie exakt bestimmt werden kann. Außerdem müssen optische Reflexionen höherer Ordnung betrachtet werden, welche makroskopisch über die Streueigenschaften der Probe zusammengefasst werden. Ein gewisser Anteil der einfallenden Lichtleistung wird entsprechend der Fresnelschen Formeln an der ersten Grenzschicht transmittiert und kann anschließend mit eingelagerten Partikeln durch Mehrfachreflexion, also interner Streuung, wechselwirken. Diese Partikel sind im Falle von Druckfarben spektral selektiv absorbierende Farbpigmente. Die Streuung im Bedruckstoff (im Falle von Rasterdruckverfahren) leistet einen wesentlichen Beitrag zu den kollektiven optischen Probeneigenschaften [Happel u. a., 2014]. Diese hohe Komplexität der optischen Eigenschaften der Probenoberflächen kann durch die wellenlängenabhängige bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion (*BRDF*) erfasst werden, welche die Abhängigkeiten der Reflexion vom Einfalls- und Ausfallswinkel und der Lichtwellenlänge beschreibt [Nicodemus, Richmond, Hsia, Ginsberg und Limperis, 1977].

$$BRDF(\theta_e, \phi_e, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r, \lambda)}{dL_e(\theta_e, \phi_e, \lambda) \cdot \cos(\theta_e) \cdot d\Omega_e} \quad (12)$$

Wobei $\theta_{e,r}$ die Polarwinkel der Richtung des einfallenden und der reflektierten Lichtstrahlen beschreiben, $\phi_{e,r}$ sind die Azimutwinkel des einfallenden und der reflektierten Lichtstrahlen. $L_{r,e}$ steht für die reflektierte und die einfallende Leuchtdichte, $d\Omega$ bezeichnet das betrachtete Raumwinkelement.

In den Grenzfällen eines perfekten, Lambertschen Diffusors, sowie im Falle einer perfekt spiegelnden Oberfläche lässt sich die *BRDF* einfach rechnerisch handhaben. Jedoch lassen sich alle in der Realität auftretenden Zwischenfälle kaum analytisch behandeln und voraussagen, sondern werden empirisch durch Messungen erfasst. Im Forschungs- und Entwicklungsfeld der modernen Computergrafik werden analytische Näherungsmodelle der *BRDF* für verschiedene Oberflächen entwickelt. Diese werden eingesetzt, um realistische Darstellungen von dreidimensionalen Objekten zu erzeugen [Filip und Haindl, 2009; Meyer-Spradow und Loviscach, 2003; Schlick, 1994]. Diese Modelle genügen allerdings nicht den messtechnischen Ansprüchen, welche eine Voraussage von Messdaten oder die Übertragung von Messungen unter verschiedenen Geometrien ermöglichen würde. Es muss für eine betreffende Probe die vollständige *BRDF* bekannt sein, um aus der Messung unter einem bestimmten Einfalls- und Ausfallswinkel auf die Messwerte unter einer anderen Geometrie zurückschließen zu können. Da im Allgemeinen die *BRDF* nicht in dieser Präzision bekannt ist muss die Geometrie, unter welcher eine Probe farbmestechnisch erfasst wird, im Detail bekannt sein. Somit kann der Messwert unter einer bestimmten Messgeometrie als ein rechnerischer, geometrischer Spezialfall aus der vollständigen *BRDF* abgeleitet werden. Jedoch muss die Messgeometrie genau definiert und eingehalten werden, um Messungen mit verschiedenen Geräten vergleichbar zu gestalten. Aufgrund bauartbedingter Unterschiede der Geräte verschiedener Hersteller ist es trotz normierter Messgeometrien und Bedingungen oft schwierig, die Messergebnisse miteinander zu vergleichen [Rich und Martin, 1999].

In der Industrie werden je nach Anwendungsfeld hauptsächlich zwei Messgeometrien eingesetzt. Diese sind in Abbildung 10 schematisch dargestellt. Im Bereich der Grafik und des Drucks wird meist die Messung der diffusen Reflexion angewendet. Hierbei wird unter 45° relativ zu Oberflächennormalen die Probenoberfläche beleuchtet und unter 0° gemessen, wobei auch die beiden Raumrichtungen vertauscht werden könnten. Diese Bedingung wird benannt als $45^\circ x : 0^\circ$ Messgeometrie [CIE, 2004]. Hierbei wird im Falle glatter und diffuser Proben die spekulare Komponente, also die direkte Reflexion an der ersten Grenzschicht, nicht in der Messung berücksichtigt. Das x in der Bezeichnung deutet an, dass die Beleuchtung gerichtet x auf die Probenoberfläche einfällt. Um die Abhängigkeit der Messung von einer Vorzugsrichtung der geometrischen Struktur der Probenoberfläche zu verringern, wird in der Praxis meist mit einer ringförmigen Beleuchtung gearbeitet. In der zugehörigen Bezeichnung $45^\circ a : 0^\circ$ steht das a für 'annular'.

In anderen Bereichen der Industrie wird meist mit der $d(i, e) : 8^\circ$ Messgeometrie gearbeitet. Hierbei wird das Messfeld möglichst diffus (das d steht für 'diffus') und homogen aus allen Raumrichtungen durch eine Ulbrichtkugel ausgeleuchtet (siehe Abbildung 10 mittlere Darstellung). Das Spektrometer misst unter einem Winkel von 8° zur Oberflächennormalen, spektral aufgelöst das von der Probenoberfläche reflektierte Licht. Eine ebenfalls bei 8° gegenüberliegende Glanzfalle kann geöffnet werden, um den Glanz, also die direkte Reflexion an der Probenoberfläche, in der Messung wahlweise mit einzuschließen oder durch Öffnen der Glanzfalle zu unterdrücken. Die Information über den Glanz wird in der Nomenklatur der Messgeometrie berücksichtigt:

- mit Glanz: $di : 8^\circ$
- ohne Glanz: $de : 8^\circ$

Je nach Anwendung muss der Glanz in der spektralen Messung einbezogen werden. Die Reflexion im Glanzwinkel kann als zusätzliche Information zur gemessenen Reflexion ohne Glanz berücksichtigt werden. Wenn ein Produktionsprozess starken Einfluss auf den Glanzgrad der Oberfläche hat, oder wenn die Oberflächen sehr stark glänzen und somit der Farbeindruck dominant in der spekularen Komponenten der Reflexion erzeugt wird, sollte die Glanzkomponenten in der Messung eingeschlossen werden. Der Glanz kann auch als indirekte Messung der Rauheit der Oberfläche Verwendung finden. Diese Herange-

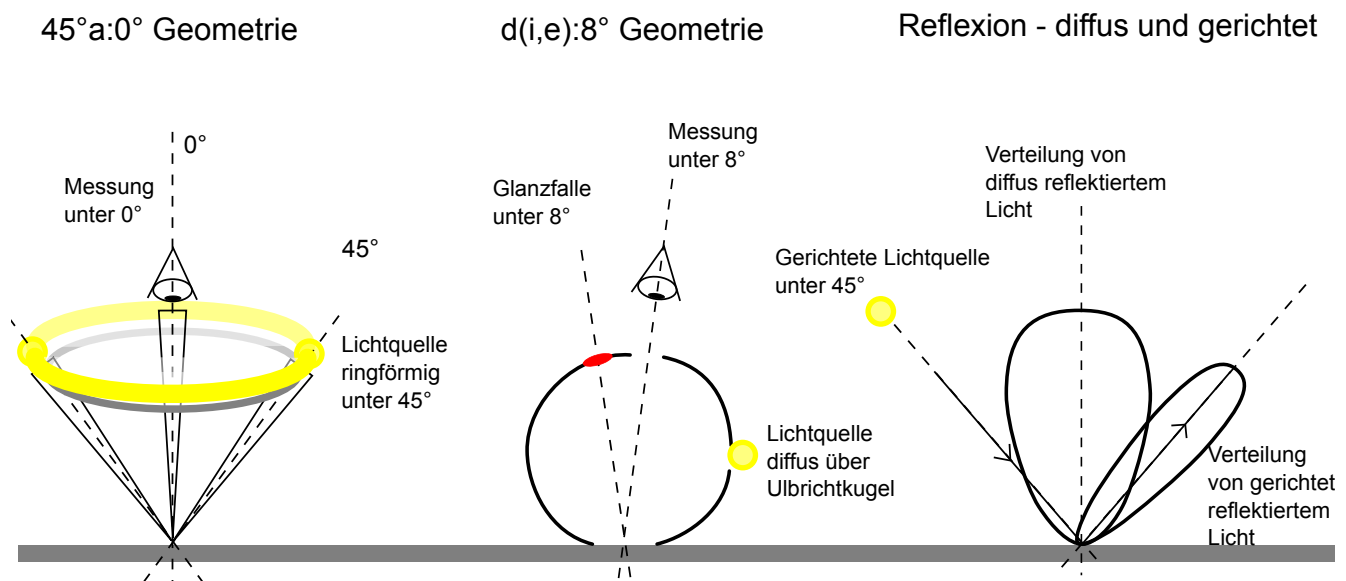


Abbildung 10: Auf der linken Seite und in der Mitte sind die am häufigsten angewendeten optischen Geometrien, welche in der Farbmessung eingesetzt werden, dargestellt. Links wird zirkular unter 45° die Objektoberfläche beleuchtet, die Messung findet unter 0° zur Oberflächennormalen statt. In der Konvention der Nomenklatur steht an erster Stelle die Beleuchtungsgeometrie, danach folgt die Geometrie der Messung (Bsp: $45^\circ a : 0^\circ$). In der Mitte ist die Messbedingung $d(i,e) : 8^\circ$ dargestellt. Es wird die Objektoberfläche über eine Ulbrichtkugel aus allen Raumwinkeln diffus beleuchtet, die Detektion findet unter 8° statt. Auf der rechten Seite ist die schematische Aufteilung der Probenreflexion in den diffus gestreuten Anteil und der Reflexion erster Ordnung dargestellt, welche symmetrisch zum Einfallswinkel ausfällt. Die verschiedenen Messgeometrien erfassen verschiedene Anteile der allgemeinen $BRDF$ der Probe. Daher muss die Messgeometrie eindeutig definiert und zum Vergleich von Messwerten beibehalten werden.

hensweise kann beispielsweise in der Qualitätssicherung von lackierten Oberflächen eingesetzt werden. Die normierten Messgeometrien werden in [CIE u. a., 2004] im Detail beschrieben und definiert.

Weitere Details zu den Messbedingungen der Messgeometrie und der Datenverarbeitung für die Industrie-segmente Druck und Grafik finden sich in dem internationalen Standard [ISO13655, 2009]. Neben der optischen Geometrie der Messung werden hier auch weitergehende Details, wie die relative spektrale Leistungsverteilung und die Polarisation der beleuchtenden Einheit, die einzuhaltende Messapertur und die korrekte Verarbeitung der erfassten Daten, festgelegt. Die durch den Standard definierten Messbedingungen sind zum einen notwendig um eindeutige Messergebnisse auf bedruckten Papieren, welche mit Fluoreszenz basierten optischen Aufhellern angereichert sind zu erhalten [Shakespeare und Shakespeare, 1999], zum anderen um der Farbmessung auf noch nassen Farben [Pawlowski, 2012] durch Einsatz der gekreuzten Polarisation gerecht zu werden. Es werden die folgenden Messbedingungen definiert [ISO13655, 2009]:

- M0: Beleuchtungstyp CIE A Schwarzkörperstrahler mit $T = 2856 \text{ K} \pm 100 \text{ K}$
- M1: Beleuchtungstyp CIE D50
- M2: Beleuchtung mit UV-Langpassfilter
- M3: Beleuchtung und Detektion polarisiert (90° rel. rotiert)

Die Messbedingung M0 wurde nachträglich definiert, um den am häufigsten in Farbmessgeräten eingesetzten Glühlampen gerecht zu werden. Die Messbedingung M1 soll eine Messung ermöglichen, welche der menschlichen Wahrnehmung an einem typischen sonnigen Tag entspricht. Die Messbedingung M2 ermöglicht durch die Unterdrückung der Fluoreszenzanregung der optischen Aufheller eine einheitliche Messbedingung unabhängig von der genauen spektralen Leistungsverteilung der Beleuchtung. Die Bedingung M2 erlaubt eine vergleichbare Messung, auch wenn das zur Beleuchtung eingesetzte Spektrum nicht der nach CIE-D50 normierten spektralen Leistungsverteilung entspricht.

Unter der Messbedingung M3 wird mittels Einsatz von gekreuzter Polarisation die direkte Reflexion in Richtung des messenden Sensors unterdrückt. Diese wird auch unter der Messgeometrie $45^\circ a : 0^\circ$ durch Unebenheiten, bzw. Rauheit der Probenoberfläche verursacht. Das ist insbesondere notwendig, wenn in der Druckmaschine kurz nach dem Farbabriss die Farbe gemessen werden soll, da hier die Oberfläche der Farbe sehr rau ist [Pawlowski, 2012]. Hierbei wird ausgenutzt, dass die Reflexion an einer Oberfläche die Polarisation der elektromagnetischen Welle erhält, wenn die einfallende Welle senkrecht oder parallel zur Einfallsebene polarisiert ist. Hingegen gestreute Anteile der Welle, welche insbesondere durch mehrfache Wechselwirkung im Substrat oder auch in der Farbschicht zurückgeworfen werden, zeigen eine statistische Verteilung des Polarisationsvektors [Stover, 1995, Kap.5]. Somit kann der gestreute Anteil, der entsprechend des Polarisationsfilters des Detektors polarisiert ist, gemessen werden. Nachteilig ist hierbei, dass ein großer Anteil des einfallenden Lichtes durch die Polarisationsfilter absorbiert oder reflektiert wird. Daher muss zum Erreichen eines hinreichenden Signal zu Rauschverhältnis die Bestrahlungsstärke auf der Probenoberfläche oder die Integrationszeit stark erhöht werden. Die erhöhte Integrationszeit führt zu einer nachteiligen Verlängerung der Messzeit. Hohe Bestrahlungsstärken können beispielsweise im Fall von bedruckten Kunststofffolien zu nicht reversiblen Veränderungen der Messprobe führen. Im Prozess der Farbmessung ist die Definition des verwendeten Beleuchtungsspektrums aufgrund der optischen Aufheller und der Topologie von glänzenden Oberflächen relevant.

Des Weiteren muss beachtet und definiert werden, unter welcher rechnerischen Bedingung aus gemessenen Reflexionsspektren Farbkoordinaten berechnet werden. Wie schon weiter oben definiert, wurden die Normspektralwertkurven unter zwei Bedingungen bestimmt. Diese Daten und ein zusätzliches Normspektrum werden verwendet um CIE-XYZ und daraus CIE-L*a*b* Farbkoordinaten zu berechnen [ISO13655, 2009; CIE, 2004]:

$$X = \int_{\lambda=380}^{730} \bar{x}(\lambda) S_{CIE}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (13)$$

$$Y = \int_{\lambda=380}^{730} \bar{y}(\lambda) S_{CIE}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (14)$$

$$Z = \int_{\lambda=380}^{730} \bar{z}(\lambda) S_{CIE}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (15)$$

Hierbei sind \bar{x} , \bar{y} und \bar{z} die Normspektralwertkurven nach CIE 1931. Es können ebenfalls die neueren Werte \bar{x}_{10} , \bar{y}_{10} und \bar{z}_{10} nach dem Farbsystem nach CIE 1964 verwendet werden, wodurch sich natürlich bei gleichbleibendem gemessenen Reflexionsspektrum $R(\lambda)$ der Probe numerisch verschiedene Farbkoordinaten X , Y und Z ergeben. Ähnlich verhält es sich bei dem zur Gewichtung eingesetzten Normspektrum $S_{CIE}(\lambda)$. Meistens wird das D50 oder D65 Spektrum eingesetzt. Beide führen natürlich ebenfalls zu unterschiedlichen Werten der Farbkoordinaten. Somit muss bei der Angabe der Farbkoordinaten immer angegeben werden unter welcher Bedingung das Reflexionsspektrum gemessen wurde, sowie mit welchen Normspektralwertkurven- und Normspektraldaten die Koordinaten berechnet wurden. Im Bereich der Grafik und der Druckindustrie wird in der Regel mit der Norm nach CIE 1931 gearbeitet, die Farbkoordinaten werden also unter $2^\circ D50$ berechnet.

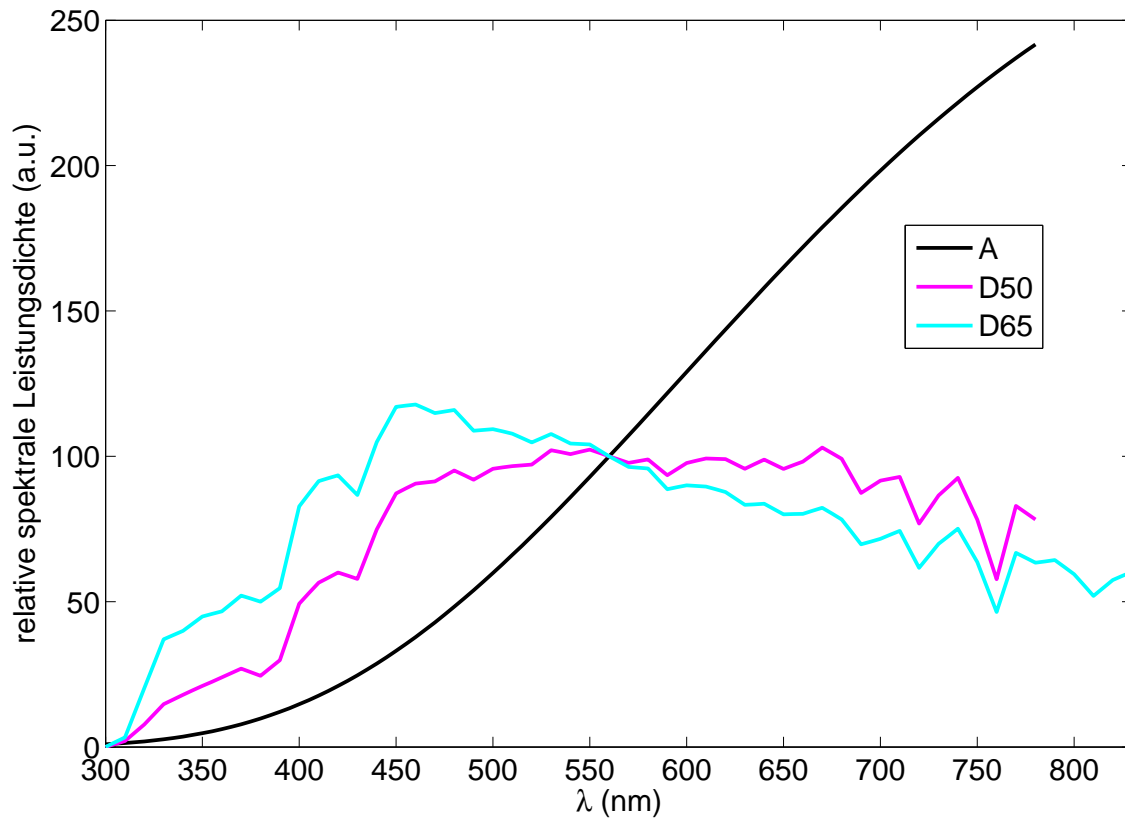


Abbildung 11: Aufgetragen sind die relativen spektralen Leistungsverteilungen der für die Farbmessung relevanten Normspektren CIE-A, CIE-D50 und CIE-D65 [CIE, 2004].

Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Definition der X, Y und Z Farbkoordinaten nicht hinreichend ist, um einen Farbraum zu erhalten, der es ermöglicht auf einfache Art die menschliche Farbwahrnehmung widerzuspiegeln [MacAdam, 1942; Brown und MacAdam, 1949]. Daraufhin wurde das CIE-1976-Lab System entwickelt und im Jahr 1978 veröffentlicht [CIE, 1978]. Darin wird eine Farbraumtransformation von CIE-XYZ auf CIE-L*a*b* Koordinaten definiert, welche empirisch eine bessere Anpassung an die visuelle Farbwahrnehmung des Menschen bewerkstelligt. Die Transformation ist definiert durch [ISO13655, 2009]:

$$L^* = 116 \cdot f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \quad (16)$$

$$a^* = 500 \cdot \left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right) \quad (17)$$

$$b^* = 200 \cdot \left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right) \quad (18)$$

mit der Funktion $f(x)$:

$$f(x) = \begin{cases} x^{1/3} & : x > (24/116)^3 \\ (841/108) \cdot x + 16/116 & : x \leq (24/116)^3 \end{cases} \quad (19)$$

Wobei X_n , Y_n und Z_n den Koordinaten auf dem perfekt reflektierenden Weiß $R(\lambda) == 1$ entsprechen, welche daher nur durch den gewählten Standardbeobachter und dem Spektrum S_{CIE} definiert sind. Der CIE-L*a*b* Farbraum ermöglicht es nun auf einfache Weise durch die Berechnung des euklidischen Abstandes zweier Farbvektoren Farbunterschiede zu berechnen, welche näherungsweise der menschlichen Farbwahrnehmung von Farbabständen entsprechen [Robertson, 1977]. Die farbmetrische Abweichung von zwei Farbkoordinaten wird somit entsprechend der Norm [ISO13655, 2009] wie folgt berechnet:

$$\Delta E76 = |C_1 - C_2| = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (20)$$

Eine weitere Optimierung der Anpassung der Farbmetrik wurde durch die Farbabstandsformel $\Delta E00$ eingeführt [CIE, 2001; Luo u. a., 2001]. In vielen Bereichen wird allerdings entgegen der Empfehlungen der CIE mit dem einfachen euklidischen Abstand, also mit der Farbabstandsformel nach $\Delta E76$, gearbeitet. Daher wird auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit diese Metrik eingesetzt. Ausführungen zu komplexeren, multivariaten Metriken nach dem ASTM E2214-02 Standard [ASTM-E12, 2006] sind in den Arbeiten von Wyble und Rich [2007a,b] zu finden.

2.2.3 Anzahl der spektralen Kanäle zur Objekterfassung

Die optische, kamerabasierte Erfassungsmethode einer zu untersuchenden Oberfläche muss hinsichtlich der zu vermessenden spektralen Freiheitsgrade abgewogen werden. Unterschiede der gemittelten Oberflächenreflexion können mit einem einzigen Kanal erfasst werden. Sollen zusätzlich spektrale Änderungen der Oberflächenreflexionseigenschaften gemessen werden, ist eine Mehrzahl von Kanälen notwendig. Eine Grau-Kamera verfügt über einen einzigen Sensorkanal, somit können von dieser, ohne den Einsatz weitere optischer Elemente, lediglich integrale Helligkeitsdifferenzen erfasst werden. Farb-Kameras verfügen über drei spektrale Kanäle. Ist die Anzahl der Kanäle größer als drei spricht man im Allgemeinen von einer multispektralen Kamera. Ein weitere verwendete Bezeichnung ist die hyperspektrale Kamera. Es gibt allerdings keine einheitliche Definition ab welcher Anzahl von Kanälen dieser Begriff verwendet wird. In der Regel haben hyperspektrale Kameras mehrere zehn bis hundert Kanäle. In diesem Fall wird dann auch von orts aufgelöster Spektroskopie gesprochen. Da jeder Kanal einen Anstieg der zu erfassenden und zu verarbeitenden Datenmenge bedeutet, muss hinsichtlich der messtechnischen Applikation zwischen der örtlichen, der spektralen und der zeitlichen Auflösung abgewogen werden.

Historisch betrachtet waren die ersten Kamerasensoren lediglich fähig basierend auf einem Kanal Helligkeitsunterschiede von Objektoberflächen aufzulösen. Die spektrale Empfindlichkeit dieses einen Kanals entspricht im Wesentlichen der typischen Charakteristik des Absorptionsverhalten einer Siliziumbasierten Photodiode (siehe Abbildung 3). Oft wird heutzutage bei einfachen Grau-Kameras lediglich ein Infrarot-Sperrfilter eingesetzt, um die Absorption von Wellenlängen jenseits des sichtbaren Bereichs zu vermeiden, da die meisten Objektive lediglich für den sichtbaren Wellenlängenbereich korrigiert sind. Darauf folgend wurden die ersten digitalen Farbkameras realisiert, welche sich durch den Einsatz von drei spektral verschiedenen Kanälen auszeichnen. Deren spektrale Empfindlichkeiten werden möglichst an die CIE Normspektralwertkurven (siehe Abbildung 9) angepasst. Hierdurch wird die Erfassung der Objektfarben, angelehnt an das menschliche Farbwahrnehmungsvermögen, ermöglicht. Es haben sich zur spektralen Separation verschiedene Technologien etabliert. Dazu zählen beispielsweise das Aufbringen von Absorptionsfiltern, die spektrale Aufspaltung durch Farbteiler oder der Einsatz eines dispersiven optischen Elements (Glasprisma, optisches Gitter). Aus wirtschaftlichen Gründen basieren die meisten Farbkameras auf Absorptionsfiltern.

Die multispektrale Bilderfassung beschreibt kamerabasierte Technologien, welche sich dadurch auszeichnen, dass die Anzahl der Bildkanäle größer als die gewöhnliche Kombination der drei RGB Farbkanäle ist. Ein weit verbreiteter Fall ist der Einsatz eines zusätzlichen Kanals im nahinfraroten Spektralbereich, der es erlaubt, erweiterte Informationen über die erfassten Objekte zu erlangen. Typische Anwendungsfelder liegen in der Fernerkundung [Slater, 1985] sowie im Bereich der medizinischen Diagnostik [Levenson und Mansfield, 2006].

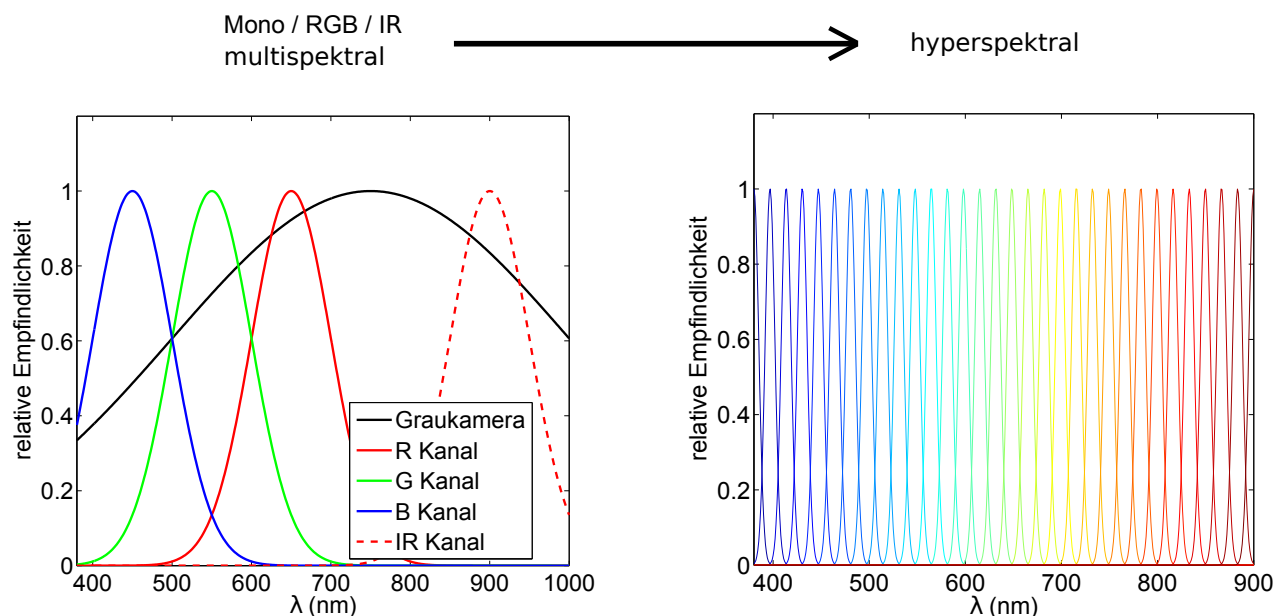


Abbildung 12: Aufgetragen sind die relativen spektralen Empfindlichkeiten über die Wellenlänge λ für verschiedene Kameratypen. Auf der linken Seite sind die Grenzfälle einer Grau-Kamera, und einer RGB Farb-Kamera zu sehen. Zusätzlich ist ein im infraroten Spektralbereich sensibler Kanal gezeigt, der eine weit verbreitete Erweiterung einer Farb-Kamera darstellt. Auf der rechten Seite ist der Grenzfall einer hyperspektralen Kamera dargestellt. Mehrere 10 Kanäle ermöglichen in diesem Fall detaillierte spektrale Messungen wie sie auch mit einem typischen spektrometerbasierten Farbmessgerät durchgeführt werden.

Neben der einfachen Erweiterung eines RGB Systems um einen Infrarotkanal finden in vergleichbaren Anwendungsfeldern Systeme mit 5-12 Kanälen Anwendung. Wobei anhand der Kanäle Kontraste im Bild erzeugt werden, welche durch die typischen breitbandigen RGB Filter nicht sichtbar gemacht werden können. Eine prominente Anwendung liegt in der Fluoreszenzmikroskopie [Andersson u. a., 1987]. Es werden weiterhin die Bilddaten des Infrarotkanals in der Fernerkundung dazu verwendet, um den Vegetationsindex zu bestimmen. Dieser wird zur Vermessung der anteiligen Flächendeckung der Vegetation eingesetzt. Zur Bestimmung des Vegetationsindex wird ausgenutzt, dass die Reflexion von Chlorophyll im infraroten Spektralbereich stark ansteigt [Rondeaux u. a., 1996]. Weitere Anwendungsfelder finden sich in der Textilindustrie [Herzog und Hill, 2003] sowie in der Biologie und der Medizin [Vilaseca u. a., 2008; Levenson und Mansfield, 2006].

Wird eine spektrale Auflösung benötigt, welche den Anforderungen einer spektroskopischen Messung gerecht wird ($\Delta\lambda < 10 \text{ nm}$), werden hyperspektrale Systeme eingesetzt. Diese werden meist auf Basis eines dispersiven Elements, also einem Gitter oder einem Prisma, aufgebaut [Davis u. a., 2002]. Solche Systeme werden im medizinischen Bereich eingesetzt [Lu und Fei, 2014] sowie zum Beispiel bei der Digitalisierung von historischen Gemälden und archäologischen Objekten [Liang, 2012]. Ein weiteres Anwendungsfeld liegt in der Kontrolle und der Qualitätssicherung in der Lebensmittelindustrie [Wu und Sun, 2013a,b; Gowen u. a., 2007].

Hyperspektrale Systeme basieren in der Regel auf einem Matrixsensor, welcher im seriellen Zeilenerfassungsmodus betrieben wird. Hierbei wird die spektrale Dimension entlang einer Richtung des Sensors mittels des dispersiven optischen Elements aufgelöst. Die verbleibende Richtung wird zur räumlichen Erfassung des Objektes verwendet, wodurch eine Bewegung des Objektes relativ zur Kamera nötig wird, um dieses vollständig zu erfassen.

Neben diesen auf der zeilenweisen Erfassung des Objektes basierenden Ansätzen wurden auch alternative optische Ausführungen realisiert, welche es ermöglichen, ein Objekt vollflächig und spektral aufgelöst

innerhalb eines einzelnen Bildes aufzunehmen [Hagen und Kudenov, 2013]. In diesen Systemen wird durch ein spezielles optisches dispersives Element lokal die spektrale Information auf eine Mehrzahl von Pixeln aufgespalten, wobei allerdings die zweidimensionale Information des Bildinhaltes mit einer geringeren Auflösung erhalten bleibt. Zur Erzeugung der dreidimensionalen Datenstrukturen (spektraler Bildwürfel) müssen die erfassten Rohdaten entsprechend der Ausführung des optischen System sortiert und normiert werden. Ein weiterer Ansatz basiert auf elektronisch kontrollierbaren optischen Transmissionsfiltern, welche zusammen mit einer Grau-Kamera eingesetzt werden [Gat, 2000].

Mit den verschiedenen Ansätzen lässt sich in einem weiten Bereich die Informationsdichte zwischen der spektralen und der räumlichen Komponente umverteilen. Angepasst an die Applikation muss das Design des Systems ausgelegt werden. Dabei sind die relevanten Parameter: Die Datenbandbreite N_{px}/s gegeben durch Sensor, die Bestrahlungsstärke, die Schnittstelle und die Datenverarbeitung, die spektrale Bandbreite des einzelnen Kanals $\Delta\lambda$, die zu erfassende gesamte Bandbreite $\Delta\lambda_{ges}$ und die Dynamik des zu erfassenden Objektes oder Prozesses. Somit muss entsprechend der messtechnischen Aufgabe sorgsam abgewogen werden, welche der diversen Realisierungsmöglichkeiten die besten, bzw. hinreichende Ergebnisse liefern kann.

2.2.4 Bestimmung der Mindestanzahl von spektralen Kanälen zur Farbmessung

Entsprechend der Norm ISO13655 [2009] wird empfohlen im Falle der Farbmessung von Grafiken das Reflexionsspektrum von $\lambda = 380\text{-}780\text{ nm}$ zu messen. Mindestens muss der spektrale Wellenlängenbereich von $\lambda = 400\text{-}700\text{ nm}$ abgedeckt werden. Die Stützstellen sollten einen Abstand von $\Delta\lambda = 10\text{ nm}$ aufweisen, wobei die spektrale Empfindlichkeit eines jeden Kanals dreiecksförmig sein sollte, mit einer Halbwertsbreite von $\Delta\lambda_{hwb} = 10\text{ nm}$. Als maximaler Abstand der Stützstellen wird $\Delta\lambda_{max} = 20\text{ nm}$ genannt. Somit ist die geringste Anzahl der zugelassenen Kanäle 16, was nach obiger Diskussion als eine hyperspektrale Kamera ausgeführt werden müsste. Das würde allerdings eine sehr große zu verarbeitende Datenrate und einen komplexen optischen Apparat implizieren. Unter Einbußen der Allgemeingültigkeit der Farbmessung ist es möglich mit einer geringeren Anzahl von Kanälen zu arbeiten. Statistische Methoden können bemüht werden, um besser zu verstehen, wieviele Kanäle ein System aufweisen muss, damit dieses einen gegebenen Farbraum erfassen kann.

Eine numerische Methode zur Untersuchung der Dimensionalität eines spezifischen Farbraums wird von Hardeberg [2002] diskutiert. Hardeberg analysiert gegebene Spektraldatensätze mittels Singulärwertzerlegung. Ziel ist es hierbei die Frage zu beantworten, wie viele unabhängige Basisvektoren notwendig sind, um den gegebenen Spektraldatensatz mit hinreichender Genauigkeit als Linearkombination der Basisvektoren darstellen zu können. Ist die Anzahl der nötigen Basisvektoren bekannt, kann wiederum eine Schlussfolgerung auf die minimale Anzahl linear unabhängiger Kanäle zur Erfassung des gesamten Datensatzes geschlossen werden.

Im Folgenden wird ebenfalls die Singulärwertzerlegung auf Beispieldatensätzen angewendet, jedoch wird ein auf die Farbmessung optimiertes Verfahren zur Bestimmung der Anzahl der Basisvektoren N_Λ verwendet. Als Maß wird die farbmimetrische Abweichung ΔE_{76} eingesetzt. Hardeberg [2002] hingegen beruft sich auf eine möglichst exakte Reproduktion des Spektrums und entwickelt hierfür eine spezifische Metrik. In beiden Ansätzen wird in einem ersten Schritt der zu analysierende Spektraldatensatz mittels Singulärwertzerlegung [Golub und Reinsch, 1970] auf eine orthogonale Basis transformiert, deren Basisvektoren $E_{R,i}(\lambda)$ hinsichtlich der zugehörigen Singulärwerte sortiert sind. In diesem Zusammenhang wird auch von der statistischen Signifikanz gesprochen. Gemeint ist hiermit, dass der Informationsgehalt der jeweiligen Eigenvektoren $E_{R,i}(\lambda)$ mit dem Betrag des zugehörigen Singulärwertes $\Lambda_{R,i}$ korreliert. Nun wird jedes einzelne der Reflexionsspektren mit $N_\Lambda = 1 \dots N_R$ Basisvektoren dargestellt und die entsprechend der Metrik resultierende Abweichung zum initialen Referenzspektrum bestimmt.

In Abbildung 13 sind die hier abgeleiteten Ergebnisse dargestellt. Als Metrik zur Bestimmung der Anzahl von Basisvektoren wird die Farbmimetrik eingesetzt. Es wurden drei Farbdatsätze betrachtet, um einen Eindruck des Einflusses der Dimensionalität des analysierten Datensatzes zu erhalten. Der Pan-

tone Datensatz (amerikanisches System für Sonderfarben) besteht hier aus 2068 einzelnen Reflexions-Spektren. Der HKS Datensatz (deutsches System für Sonderfarben) beinhaltet 91 Reflexions-Spektren. Der IT8 (der Farbumfang entspricht etwa dem IT8, wobei hier eine höhere Anzahl von Farbproben erzeugt wurde), welcher im Offsetdruck durch die Prozessfarben CMYK hergestellt wurde, besteht aus 1617 Reflexions-Spektren. Die drei Datensätze basieren auf Messdaten, welche mit einem *Konica Minolta FD-7* Farbmessgerät aufgenommen wurden.

Vergleicht man die Daten des Konvergenzverhaltens des mittleren Farbfehlers $\overline{\Delta E76}$ über die Anzahl der verwendeten Basisvektoren N_Λ in Abbildung 13 fällt direkt auf, dass sich der HKS und der Pantone Datensatz ähnlich verhalten. Hingegen ist ersichtlich, dass der IT8 durch eine geringere Anzahl von Basisvektoren reproduziert werden kann. Letzteres kann auf die geringere Anzahl von Primärfarben des Druckes zurückgeführt werden.

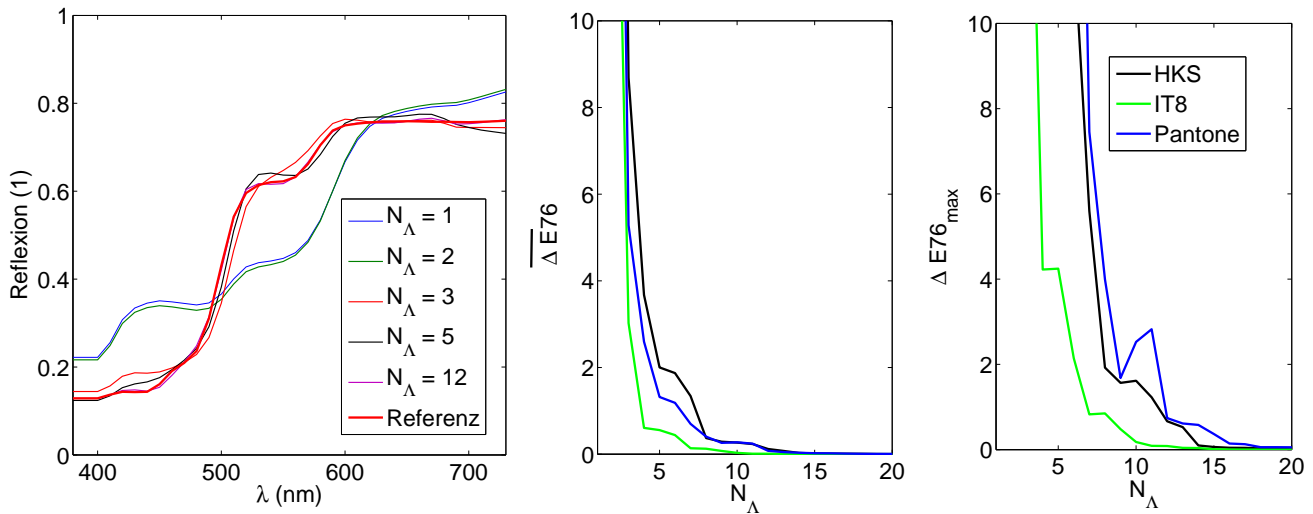


Abbildung 13: Auf der linken Seite ist anhand eines Beispiels eines Reflexions-Spektrums gezeigt, wie mit steigender Anzahl der Basisvektoren N_Λ das aus der Überlagerung (Linearkombination) resultierende Reflexions-Spektrum zum initialen Referenz-Reflexions-Spektrum konvergiert. Auf der rechten Seite ist über drei exemplarische Datensätze der gemittelte $\overline{\Delta E76}$ und der maximale Farbfehler $\Delta E76_{max}$ über die Anzahl der verwendeten Basisvektoren N_Λ aufgetragen. Ab ca. $N_\Lambda = 10$ Basisvektoren kann der Farbdatensatz mit einem mittleren Farbfehler kleiner eins $\overline{\Delta E76} < 1$ reproduziert werden.

Eine wesentliche Aussage aus der Analyse liegt in der Erkenntnis, dass die Datensätze ab einer Anzahl von ca. 10 Basisvektoren präzise reproduziert werden können, der mittlere zu erwartende Farbfehler liegt hier im Falle des IT8 bei $\overline{\Delta E76} = 0.03$. Aufgrund der höheren Dimensionalität des Pantone Datensatzes liegt der mittlere Farbfehler hier bei $\overline{\Delta E76} = 0.27$ und somit deutlich unterhalb der typischen Wahrnehmungsschwelle von ca. $\Delta E76 = 1$.

Genauso auffällig ist der Unterschied beim Vergleich des verbleibenden maximalen Farbfehlers. Hier liegt der maximale Fehler im Falle des Pantone Datensatzes erst ab 12 Basisvektoren unter eins. Im Falle von 10 Basisvektoren liegt der Fehler noch bei $\Delta E76_{max} = 2.5$. Der maximale Farbfehler bei der Analyse des IT8 Datensatzes fällt hingegen schon ab 7 Basisvektoren deutlich unter die Grenze von eins. Die beiden Fälle zeigen deutlich, dass prinzipiell abhängig von der Applikation, also insbesondere in Abhängigkeit des spektralen Funktionsraums, die Anzahl der spektralen Kanäle des multispektralen Systems bestimmt werden muss. Hierbei ist der Grundgedanke, dass jeder linear unabhängige spektrale Kanal des Systems als Basisvektor dienen kann, um den zu vermessenden Farbraum aufzuspannen. Der Pantone Datensatz wird auf Basis von 14 Primärfarben erstellt [Pantone, 2017]. Der IT8 basiert auf den 4 Prozessfarben, wobei der schwarze Anteil keine weiteren Freiheitsgrade in das System einbringt. Das hier

behandelte System soll insbesondere für farbmestechnische Applikationen, also auch insbesondere für die Messung von Sonderfarben optimiert werden, da der reine Druck mit Prozessfarben sehr gut über eine Dichtemessung anhand von drei Kanälen kontrolliert werden kann [Pawlowski, 2012]. Im Gegensatz dazu werden Sonderfarben durch die standardisierte Messung der Druckdichte nicht abgedeckt, sondern müssen mit spektralen Messungen der Reflexion erfasst werden.

2.2.5 Auslegung der Multispektralkamera zur Farbmessung

Aufgrund der vorangegangenen Analysen und weiteren technischen Randbedingungen, wurde die multispektrale Zeilenkamera mit 12 Kanälen ausgelegt. Wegen der hohen Kosten für eine Sensorentwicklung, wird als Grundlage ein verfügbares Zeilenkamerasystem eingesetzt. Bei der Auswahl muss der Schwerpunkt auf die Betrachtung der Datenqualität (Rauschen, Linearität), der geometrischen Größe des Sensors und der Anzahl verfügbarer Pixel gelegt werden.

Die Wahl fiel auf einen CCD Sensor mit 7300 Pixeln, was bei einer Kantenlänge der Pixel von $l_{Px} = 10\,\mu\text{m}$ einer Sensorlänge von $l_{Sens} = 7300 \cdot 10\,\mu\text{m} = 73\text{ mm}$ entspricht. Der RGB Zeilensensor wird mit vier optisch voneinander separierten Objektiven bestückt. Die Variation der spektralen Empfindlichkeiten der einzelnen Kanäle erfolgt durch optische Vorsatzfilter, welche vor jeder einzelnen Linse montiert werden (siehe Abbildung 14).

Der Sensor ist hinsichtlich der Datenerfassung und analogen Vorverarbeitung in zwei Hälften geteilt, damit durch Parallelisierung die maximale Auslesegeschwindigkeit um einen Faktor zwei erhöht wird. Durch diese Auslegung lassen sich die Verstärkungswerte der vorderen und hinteren Sensorhälfte getrennt voneinander regeln. Aufgrund dieser Geometrie ist es notwendig und naheliegend, eine gerade Anzahl von Objektiven einzusetzen, sodass die Verstärkungswerte der beiden Sensorteile unabhängig voneinander eingestellt werden können. Da pro Teilkamera durch den RGB Sensor 3 neue Kanäle erzeugt werden, ist die gesamte Anzahl der Kanäle ein Vielfaches von 3. Die vorherige Untersuchung legt eine gesamte Anzahl der Kanäle > 10 nahe, was somit zu einem System mit 4 Teilkameras und somit zu einer Anzahl von 12 Kanälen führt.

Durch das Konzept stehen über die Abtastbreite ca. 1700 Pixel zur Verfügung, was bei einer Auflösung von 100 dpi zu einer Erfassungsbreite von 430 mm führt. Somit können Druckmaschinen mit geringer Bahnbreite, wie sie etwa im Etikettendruck eingesetzt werden, mit einer Kamera bestückt werden. Bei der typischen Bahnbreite von 850 mm können zwei Kameras nebeneinander angeordnet werden. Die optomechanischen Komponenten wurden ausgelegt, sodass die Auflösung der Kamera auf einfache Weise angepasst werden kann. Multispektrale Zeilenkameras mit 50-100 dpi werden derzeit bereits von der *Chromasens GmbH* vermarktet und in Kundenapplikationen eingesetzt.

Die Vorsatzfilter sind als tauschbares Anschraubteil ausgeführt, was wiederum die Möglichkeit eröffnet, applikationsspezifisch die Transmissionen der Filter zu optimieren. Die Vorsatzfilter wurden innerhalb dieser Arbeit für messtechnische Aufgaben im Druck optimiert. Die Auswahl der Filter wurde durch Simulationen durchgeführt. Dabei wurden nur solche Filterkombinationen in Betracht gezogen, die auf Absorption basieren und kommerziell verfügbar sind. Es hat sich in weitergehenden Untersuchungen gezeigt, dass die Winkelabhängigkeit von optischen Filtern, welche auf optischer Interferenz an dünnen Schichten basieren zu stark ausgeprägt sind, um homogene Messergebnisse entlang der Zeilenrichtung zu erzielen. Durch die abbildende Optik beträgt der maximale Betrachtungswinkel etwa 20° . Problematisch gestaltet sich beim Einsatz von Interferenzfiltern, dass sich einerseits die fallenden und steigenden Flanken der Transmission über den Transmissionswinkel verschieben und andererseits die Transmission im Sperrbereich der Filter ansteigt und im Bereich der höchsten Transmission winkelabhängig geringer ausfällt. Dieses Verhalten führt in den Kamerawerten zu nichtlinearen Veränderungen des detektierten Signals auf homogenen Probenoberflächen, welche rein algorithmisch nicht mit hinreichender Genauigkeit kompensiert werden können.

Die Auswahl der hier eingesetzten Vorsatzfilter wurde halb empirisch durch eine intuitive Bewertung der Filtertransmissionen geführt. Die Filtersätze, welche in die engere Auswahl gekommen sind, wurden

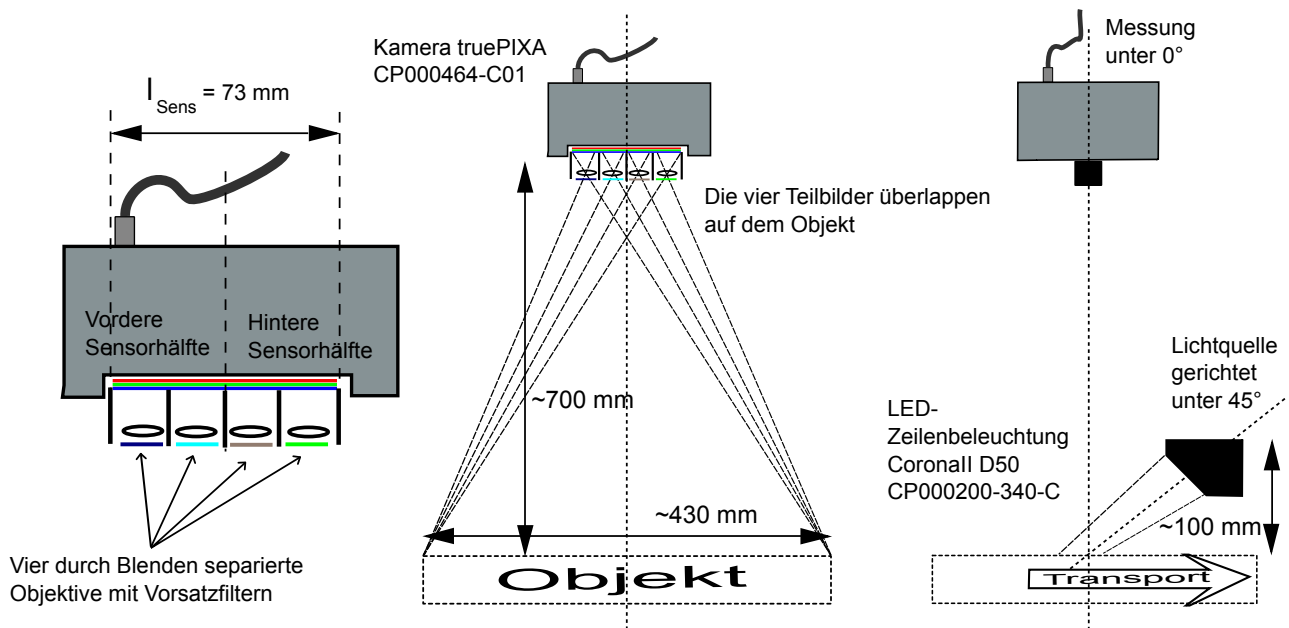


Abbildung 14: Auf der linken Seite ist der optische Aufbau der multispektralen Zeilenkamera dargestellt. Vier Objektive werden vor denselben Sensor gebracht, und durch Blenden die Bildfelder voneinander separiert. Vor den Objektiven werden Vorsatzfilter platziert, welche die spektrale Empfindlichkeit der jeweiligen Teilkamera modulieren. In der mittleren Darstellung ist zu sehen, dass sich die auf dem Sensor nebeneinander befindlichen Bildfelder auf dem Objekt überlappen. Auf der rechten Seite ist die Einbausituation mit der LED-Zeilenbeleuchtung sowie die Bewegungsrichtung des Objektes dargestellt.

durch das in *Matlab* implementierte lineare Kameramodell auf einem Testdatensatz geprüft. Die so erhaltene Auswahl wurde nachträglich durch eine sehr ausführliche numerische Optimierung validiert und konnte als eine näherungsweise optimale Konfiguration bestätigt werden [Eckhard, 2015, Kapitel 3].

Die geometrische Anordnung durch den Einsatz einer Zeilenkamera hat mehrere Vorteile im Vergleich zu auf Matrixkameras basierten Systemen. So kann in Zeilenrichtung die normierte Beleuchtungswinkel von 45° eingehalten werden, lediglich der Betrachtungswinkel weicht über den Erfassungsort von der standardisierten Geometrie ab. Wird ein ähnlicher Ansatz mit einer Matrixkamera realisiert, ergeben sich zwei Raumwinkel, in welchen die Messgeometrie nach [ISO13655, 2009] durch die Beleuchtung und die Kamera verletzt wird. Außerdem werden in Transportrichtung durch das Zeilenkamerasystem räumlich voneinander getrennte Messstellen durch die gleiche Sensorregion erfasst, was ausschließlich eine zeitliche reproduzierbare Messung voraussetzt. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die notwendigen Normierungen und Korrekturen, welche zur Kompensation der geometrischen Variationen des Systems eingesetzt werden, lediglich entlang einer Raumdimension durchgeführt werden müssen.

Die hier vorgestellte multispektrale Zeilenkamera wird in Kapitel 5 messtechnisch analysiert. Der Schwerpunkt liegt auf der möglichst präzisen Bestimmung der spektralen Empfindlichkeiten der Kamerakanäle. Darauf aufbauend werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, welche die grundlegenden Einflüsse zu erwartender Messfehler auf die Farbmessung darlegen.

2.2.6 Lineare Modell zur Berechnung des Kamerasignals

Es wird ein möglichst einfaches Modell benötigt, um das Verständnis für das Zustandekommen des Kamerasignals für eine beliebige Farbprobe entwickeln zu können. Die wesentliche Vereinfachung des Modells

liegt in der Annahme der perfekten Linearität aller zum Kamerasignal beitragender Komponenten und Prozesse.

Das Kamerasignal $K_k(R(\lambda))$ des k -ten Kanals und der i -ten Farbprobe kann in dem linearen Modell wie folgt beschrieben werden:

$$K_{k,i} = \int_{\lambda} \Psi_k(\lambda) R_i(\lambda) S_b(\lambda) d\lambda \quad (21)$$

Wobei $S_b(\lambda)$ die spektrale Leistungsverteilung der LED-Zeilenbeleuchtung ist. Somit hängt in diesem Modell das gemessene Kamerasignal $K_{k,i}$ der k -Kanäle von der Reflexion $R_i(\lambda)$ der betrachteten i -ten Farbprobe, der spektralen Leistungsverteilung der LED-Zeilenbeleuchtung $S_b(\lambda)$, welche die Probe beleuchtet und von der jeweiligen spektralen Empfindlichkeit des betrachteten Kamerakanals $\Psi_k(\lambda)$ ab. Wesentliche vereinfachende Annahmen sind hierbei:

- Das Kamerasignal ist linear.
- Alle Proben mit verschiedener gemessener Reflexion zeigen ein gleiches (lambertsches) Streuverhalten. Die Reflexion ist daher betrachtet unter (leicht) verschiedenen Raumwinkel identisch.
- Die spektrale Empfindlichkeit der Kamera ist keine Funktion der Sensorposition oder der Zeit. Sie wird also als global konstant angenommen.

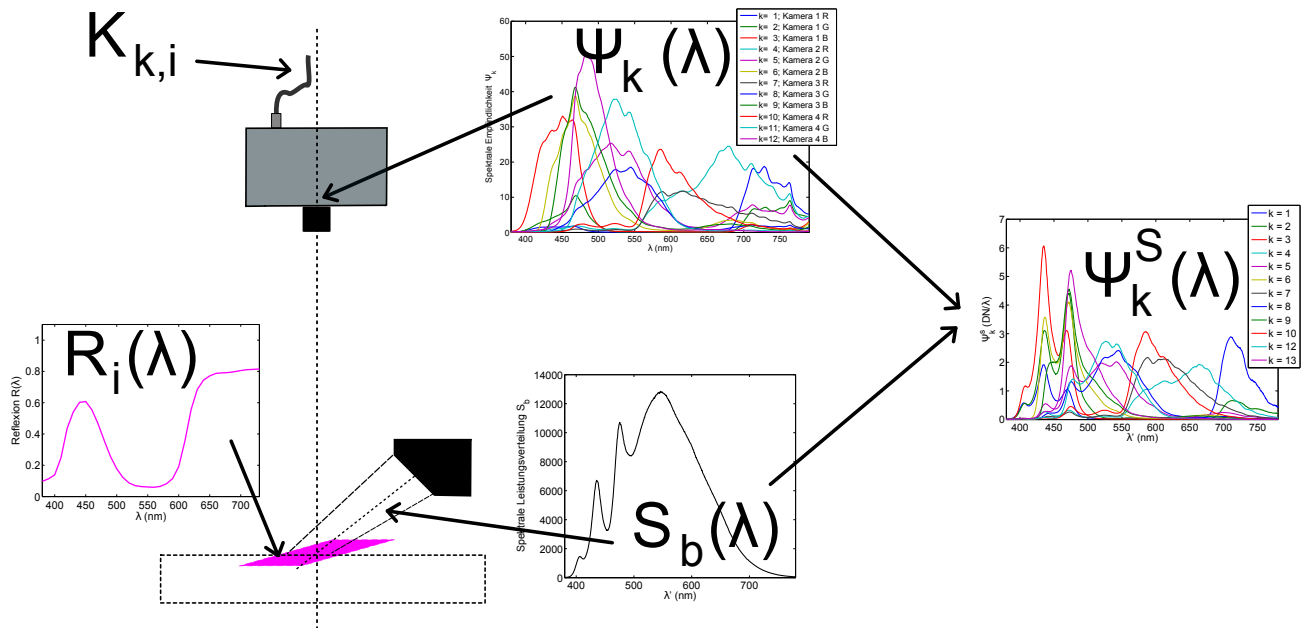


Abbildung 15: Es sind die einzelnen linearen Beträge zur Generierung des Kamerasignals $K_{k,i}$ entsprechend Gleichung 21 dargestellt. Die spektrale Leistungsverteilung der LED-Zeilenbeleuchtung $S_b(\lambda)$ fällt auf die Probenoberfläche, welche die Reflexion $R_i(\lambda)$ aufweist. Das in die Richtung der Kamera reflektierte Licht wird entsprechend der spektralen Empfindlichkeiten $\Psi_k(\lambda)$ der Kamera detektiert. Auf der rechten Seite ist dargestellt, dass die spektrale Empfindlichkeit der Kamera zusammen mit der spektralen Leistungsverteilung der LED-Zeilenbeleuchtung entsprechend Gleichung 22 zu der Systemempfindlichkeit $\Psi_k^S(\lambda)$ zusammengefasst werden kann.

Obwohl strenggenommen keine der Annahmen haltbar ist, bietet das einfache Modell jedoch einen intuitiven Zugang und ermöglicht eine hinreichend präzise Analyse der Messdaten. Auftretende Abweichungen müssen im Zusammenhang mit den diskutierten Annahmen in Relation gebracht werden. Um

die spektrale Empfindlichkeit der Kamerakanäle vermessen zu können, existieren ausgehend von Gleichung 21 zwei bekannte Ansätze. In der Messung können eine Vielzahl von bekannten Farbproben $R_i(\lambda)$ der Kamera präsentiert werden. Dabei werden mathematische Verfahren herangezogen, um aus den Datensätzen die Systemempfindlichkeit $\Psi_k^s(\lambda)$, welche sich aus der spektralen Empfindlichkeit der Kamerakanäle und dem Beleuchtungsspektrum zusammensetzt, zu bestimmen. Daher bietet es sich an, die Systemempfindlichkeit wie folgt zu definieren:

$$\Psi_k^s(\lambda) = \Psi_k(\lambda)S_b(\lambda) \quad (22)$$

In Kapitel 5 wird eine weitere Methode zur Messung der Systemempfindlichkeit $\Psi_k^s(\lambda)$ ausgearbeitet. Darauffolgend wird in Kapitel 5.5 auf Basis der erhaltenen Messdaten das lineare Modell nach Gleichung 21 verwendet, um Simulationen hinsichtlich der Genauigkeit und Sensitivität des kamerabasierten Farbmesssystems durchzuführen. Des Weiteren dient das beschriebene lineare Modell als Basis für das im Folgenden beschriebene Kalibrierverfahren.

2.2.7 Kalibrierung und spektrale Rekonstruktion

In der Literatur wird eine große Vielzahl verschiedener Ansätze zur Kalibrierung von multispektralen Kamerasystemen diskutiert, was das wissenschaftliche Interesse, sowie die technologische Relevanz für industrielle Applikationen widerspiegelt. Eine Übersicht und der Vergleich etablierter Verfahren ist in der Dissertation von Eckhard [2015] zu finden. Weitere relevante Ansätze liefern Hong u. a. [2001], DiCarlo und Wandell [2003], Heikkinen u. a. [2007], Heikkinen u. a. [2008], Ribes und Schmitt [2008] und Dierl u. a. [2016]. Nach ISO13655 [2009] ist das Ausgabeformat der Reflexionsdaten definiert. Die meisten Farbmessgeräte geben entsprechend der Norm mit einer Schrittweite von 10 nm Messpunkte über den Wellenlängenbereich von 380-730 nm aus, also 36 (unabhängige) Messwerte. Die multispektrale Zeilenkamera verfügt über zwölf Kanäle. Somit besteht die grundlegende Aufgabe einer Kalibrierfunktion darin, aus den zwölf Messwerten der Kamera ein Spektrum mit 36 Stützstellen zu berechnen. Mathematisch gesehen wird eine Abbildung A gesucht, welche den gemessenen Vektor der zwölf Kamerasignalwerte $\vec{K} \in \mathbb{R}^{12}$ auf die 36 Werte des Reflexionsspektrums $\vec{R} \in \mathbb{R}^{36}$ abbildet.

$$\vec{R} = A(\vec{K}) \quad (23)$$

Eine Kalibrierung verlangt immer nach einem Datensatz, der herangezogen werden kann, um die Abbildung A zu bestimmen. Grundsätzlich gibt es hier zwei Herangehensweisen.

Eine Möglichkeit ist, dass ein Referenzdatensatz \vec{R}_i und \vec{K}_i von $i = 1 \dots N$ bekannter Farbproben aufgenommen wird, woraus sich im ersten Schritt die inverse Abbildung A^{-1} bestimmen lässt (Details sind in der Arbeit von Urban [2005] zu finden), für welche gilt:

$$\vec{K}_i = A^{-1}(\vec{R}_i) \quad (24)$$

Wobei die \vec{K}_i Werte mit der Kamera erfasst werden und die Messungen der \vec{R}_i mit einem Referenzspektrometer aufgenommen werden. Die gesuchte Abbildung kann anschließend durch Invertierung der Abbildung A^{-1} abgeleitet werden. Die andere Herangehensweise besteht darin, dass die Abbildung A^{-1} modellbasiert und durch Messdaten gestützt bestimmt werden, wobei hier meist das stark vereinfachte Modell nach Gleichung 21 eingesetzt wird. Die Invertierung des Modells kann beispielsweise durch die Pseudoinverse, eine Hauptkomponentenanalyse oder durch die Wiener-Inverse durchgeführt werden [Urban, 2005]. Hierbei müssen allerdings die spektralen Empfindlichkeiten der Kamerakanäle, welche die Abbildung A^{-1} bestimmen, sehr präzise vermessen werden. Letzteres stellt eine nicht triviale Aufgabe dar, da jede einzelne multispektrale Zeilenkamera vermessen werden muss. Das in einem industriellen Produktionsprozess zu realisieren, ist jedoch ein erheblicher Aufwand.

Unabhängig von der genauen Herangehensweise liegt das wesentliche Problem der Kalibrierung eines multispektralen Kamerasystems in der Nichteindeutigkeit der Abbildung A^{-1} . In der Nomenklatur der Farbmessstechnik wird die Nichteindeutigkeit unter dem Begriff der Metamerie behandelt. Aus mathematischer Sicht kann im Rahmen einer linearen Abbildung des Systems die Metamerie durch die Menge an Reflexionsspektren beschrieben werden, welche durch das System auf den Nullvektor $\vec{R} = \vec{0}$ abgebildet werden. Praktisch gesehen können diese spektralen Beiträge von dem multispektralen Kamerasystem aufgrund der Beschaffenheit der spektralen Empfindlichkeiten nicht aufgelöst werden.

Im Folgenden werden wir uns auf lineare Abbildungen beschränken, da hier die Zusammenhänge in einfacher Matrixschreibweise wiedergegeben werden können. In Kapitel 4 wird messtechnisch bestätigt, dass von dem Kamerasensor keine relevanten Nichtlinearitäten zu erwarten sind. Das Problem der Metamerie lässt sich somit beschreiben über den Kern der linearen Abbildung, also die Menge von Spektren, welche durch das System auf den Nullvektor abgebildet werden $A^{-1}\vec{R}_j = \vec{0}$. Da in der Regel der Kern nicht nur den Nullvektor enthält, ergibt sich folgende Nichteindeutigkeit:

$$\vec{K}_i = A^{-1}\vec{R}_i = A^{-1}(\vec{R}_i + \vec{R}_0) \quad (25)$$

Daher ist die Abbildung A^{-1} nicht injektiv und kann somit auch nicht eindeutig invertiert werden. Der wesentliche Grund hierfür liegt in der höheren Dimension der Reflexions-Spektren $\vec{R} \in \mathbb{R}^{36}$ im Vergleich zur Dimension der Kamerasignale $\vec{K} \in \mathbb{R}^{12}$. Zusätzlich erschwerend wirkt hier, dass die spektralen Empfindlichkeiten der einzelnen Kamerakanäle nicht linear unabhängig sind.

Aufgrund dieser Gegebenheit ist eine allgemeine Invertierung der Bildgewinnungsfunktion eines solchen Systems nicht zielführend. Sinnvolle Lösungen können hier nur erzielt werden, wenn die Invertierung regularisiert wird. Ein typischer Ansatz ist hierbei das Einbinden der Kovarianzmatrix der Menge an Spektren, welche in der Applikation gemessen werden sollen. Als praktikabel hat sich eine Lösung durch Regression erwiesen, welche direkt die Abbildung A optimiert, sodass die resultierenden Spektren möglichst nahe an den Referenzspektren liegen [Eckhard, 2015]. Hierbei ist die Kalibrierung zwar stark abhängig vom eingesetzten Referenzdatensatz, allerdings lässt sich auf diesem Wege die Kalibrierung direkt an eine Applikation anpassen. Denn aufgrund der doch geringen Anzahl der Farbkanäle, lässt sich keine für jegliches Reflexionsspektrum gültige Lösung bestimmen. In diesem Zusammenhang lassen sich auch die Ergebnisse der Betrachtung der Dimensionalität typischer Farbräume anwenden (siehe Abbildung 13). Wird bei der Untersuchung jegliches in der Natur vorkommende natürliche Reflexionsspektrum mit eingebunden, zeigt sich, dass ein System mit zwölf Kanälen die Vielfalt nicht eindeutig abbilden kann [Hardeberg, 2002]. Daher diskutieren wir nun die einfache lineare Regression an einen Referenzdatensatz, welcher allerdings applikationsbezogen erzeugt werden muss. Denn die lineare Regression beinhaltet eine intrinsische Optimierung an den speziellen Datensatz und somit an den speziellen spektralen Gamut. Die Gleichung mit den N Referenzdaten lässt sich in Matrixschreibweise zusammenfassen:

$$\mathbf{R}^{36 \times N} = \mathbf{A}^{36 \times 12} \cdot \mathbf{K}^{12 \times N} \quad (26)$$

Wobei hier die Matrizen \mathbf{R} und \mathbf{K} die N vermessenen Farbproben beinhalten. Eine beidseitige Multiplikation mit der inversen Matrix der Kamerasignale führt zu der Gleichung:

$$\mathbf{R}^{36 \times N} \cdot (\mathbf{K}^{-1})^{N \times 12} = \mathbf{A}^{36 \times 12} \cdot (\mathbf{K}^{12 \times N} \cdot (\mathbf{K}^{-1})^{12 \times N}) = \mathbf{A}^{36 \times 12} \quad (27)$$

Nun lässt sich die inverse Matrix \mathbf{K}^{-1} allgemein nicht analytisch berechnen, jedoch findet sich eine numerische Lösung durch die Moore-Penrose Pseudoinverse [Penrose, 1955], welche eine numerische Optimierung der inversen Abbildung durch Anwendung einer Hauptkomponentenanalyse bedeutet. Die maximale Anzahl an beitragenden Eigenvektoren ist in diesem System durch die Anzahl der Kanäle limitiert. Daher findet sich hier nur eine eindeutige Abbildung, wenn der Referenzdatensatz durch die spektrale Empfindlichkeit der zwölf Kamerakanäle beschrieben werden kann. Wenn mehrere Reflexionsspektren des Referenzdatensatzes zu identischen Kamerasignalen führen, kann die Abbildung \mathbf{A} diese

nicht mehr auf die echten Reflexions-Spektren zurückführen. Hier schließt sich abermals der Kreis mit den vorangegangenen Betrachtungen hinsichtlich der Dimensionalität des zu erfassenden spektralen Farbraumes.

Untersuchungen mit komplexeren und vor allem nichtlinearen algorithmische Ansätzen haben gezeigt, dass prinzipiell auf einem Referenzdatensatz eine genauere Abbildung gefunden werden kann. Diese nichtlinearen Ansätze zeigen allerdings ein sensibleres Verhalten, wenn die resultierende Kalibrierung auf Farben angewendet wird, welche nicht innerhalb dem zur Charakterisierung verwendeten Datensatz liegen. Ist hingegen der zu messende spektrale Farbraum sehr genau bekannt, kann mit nicht-linearen Ansätzen eine höhere Genauigkeit erreicht werden [Eckhard u. a., 2014]. Der in Gleichungen 26 und 27 dargestellte lineare Ansatz hat noch einen weiteren Vorteil. Es kann auf einfache Weise durch die Kalibrierung das System hinsichtlich Optimierung auf der Bilderfassungsseite analysiert werden. Hierzu bestimmen wir ebenfalls durch Anwendung der Moore-Penrose Pseudoinversen die inverse Abbildung A^{-1} , welche die Abbildung von Reflexions-Spektren auf die zu erwartenden (theoretischen) Kamerasignale $K_{th}^{12 \times N}$ darstellt. Wenn nun die gemessenen über die theoretischen Kamerasignale aufgetragen werden, lassen sich hier Nichtlinearitäten, Abweichungen durch eine fehlerhafte Dunkelsignalkorrektur und Abweichungen durch eine fehlerhafte Weißpunkt Korrektur auf einfache Weise erkennen und analysieren. Die komplexeren Algorithmen sollen gerade Abweichungen wie diese eliminieren und lassen sich nicht auf einfache Weise invertieren, weshalb diese für solche weitergehenden Betrachtungen nicht geeignet sind. Innerhalb dieser Arbeit sollen allerdings genau solche messtechnischen Abweichungen analysiert werden anstatt diese durch komplexe Algorithmen zu kompensieren. Der hier beschriebene Ansatz wird in Kapitel 5.2 zur weiteren Analyse der multispektralen Zeilenkamera eingesetzt.

2.2.8 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde die multispektrale Zeilenkamera in ihren Grundzügen vorgestellt und die spezielle Ausprägung in Abgrenzung zu Farbkameras und hyperspektralen Kameras diskutiert. Die Betrachtung der Dimensionalität typischer spektraler Farbräume drucktechnischer Applikationen untermauert die Auslegung des Systems auf zwölf Farbkanäle. Ein darauf basierendes Kalibrierverfahren wurde vorgestellt, welches sich besonders eignet, um weitergehende Systemanalysen durchzuführen. Außerdem wurden die Grundzüge der an die menschliche Farbwahrnehmung angepassten Farbräume und der darauf aufbauenden Farbmatrik vorgestellt. Eine wesentliche Erkenntnis liegt darin, dass es für das vorgestellte Kamerasystem keine universale Kalibrierung gibt. Die Auswahl der Referenzdaten, welche für die Kalibrierung eingesetzt werden, muss an die farbmesstechnische Aufgabe angepasst werden. Dasselbe gilt für die Bestimmung der optimalen Anzahl von Farbkanälen, die je nach Anwendungsfall sehr unterschiedlich ausfallen kann. Es wurden Wege aufgezeigt, welche es ermöglichen spezifisch für eine Applikation eine ideale Systemkonfiguration zu finden. Eine detaillierte messtechnische Analyse des zwölf-kanaligen multispektralen Kamerasystems, die Auswirkung des Messrauschens und von systematischen Messfehlern werden in Kapitel 5 behandelt.

2.3 Grundlagen der stereoskopischen 3D-Messung

Im Folgenden werden die notwendigen Grundlagen der stereoskopischen 3D-Messtechnik ausgearbeitet. Insbesondere wird Wert gelegt auf die allgemeine Beschreibung von optischen Abbildungsfehlern, da diese schwerwiegende Auswirkungen auf die 3D-Messgenauigkeit der behandelten Stereo-Zeilenkamera haben. Ein besonderer Augenmerk der vorliegenden Arbeit liegt auf der Auswirkung der endlichen ‚Schärfe des Bildes‘, welche messtechnisch über die optische Modulationstransferfunktion (*MTF*) beschrieben wird.

2.3.1 Aktive und passive Messverfahren

Durch die vielseitigen Anforderungen an die optischen Messgeräte zur Erfassung der Oberflächentopografie von Objekten, haben sich verschiedene technologische Ansätze etabliert. Eine umfassende Übersicht wurde durch 3Dsensation [2016] zusammengestellt. Die Mehrheit der Systeme zur messtechnischen Erfassung von Oberflächentopografien basieren auf Triangulation. Hierbei wird ausgenutzt, dass die Höhe eines Punktes einer Objektoberfläche sich bei einer Projektion unter einem gegebenem Winkel in eine messbare laterale Verschiebung in der Bildebene überträgt (siehe Abbildung 16). Dieses grundlegende Messprinzip wird auf verschiedene Arten angewendet.

Zu unterscheiden sind die aktiven und die passiven auf Triangulation basierenden Messverfahren. Als aktiv gelten Laser-Lichtschnitt-Sensoren sowie Kamerasysteme, welche durch einen zusätzlichen Projektor ein Linienmuster auf die Oberfläche des zu vermessenden Objektes projizieren. Passive, auf Triangulation basierende Messverfahren, sind Stereo- oder auch Multikamerasysteme, welche allein auf Basis der erfassten Textur der Objektoberfläche arbeiten. In Abhängigkeit von den optischen Randbedingungen wird bei den passiven Verfahren lediglich die Objektoberfläche mittels einer zusätzlichen Lichtquelle ausgeleuchtet, um ein hinreichendes Signal zu Rauschverhältnis zu erhalten. Die passiven Verfahren zeichnen sich durch eine geringere technische Komplexität aus, da der zusätzliche Musterprojektor nicht vorhanden ist. Weiterhin werden bei den Musterprojektionsverfahren typischerweise zeitlich hintereinander mehrere Muster projiziert, was die gesamte Messzeit erhöht. Die Messungen der passiven Verfahren sind hingegen von der vorhandenen Textur der Objektoberfläche abhängig. Laser-Lichtschnitt-Sensoren werden in verschiedenen Applikationen eingesetzt. Sie zeichnen sich ebenfalls durch eine geringe Komplexität aus. Technische Limitierungen liegen hier in der endlichen Linienbreite der projizierten Laserlinie, sowie in der limitierten Messgeschwindigkeit.

Das in der vorliegenden Arbeit behandelte Messverfahren basiert auf passiver Triangulation, realisiert als Stereo-Farbzeilenkamera. Die wesentlichen technologischen Vorteile dieses Messverfahrens liegen in der hohen Erfassungsgeschwindigkeit ($7300 \text{ Px/Zeile} \cdot 29 \cdot 10^3 \text{ Zeilen/s} \approx 2.1 \cdot 10^8 \text{ Px/s}$) und den neben den Höhedaten verfügbaren zweidimensionalen Farbbildern, welche für weitere Inspektionsaufgaben verwendet werden können. Die geringe Komplexität des Messverfahrens ermöglicht eine einfache Skalierung des Erfassungsvolumens. Somit kann das Verfahren in den unterschiedlichsten Applikationen eingesetzt werden. Das passive Verfahren zeigt allerdings eine nicht zu vernachlässigende Abhängigkeit der Messergebnisse von der Bildqualität, welche im Wesentlichen durch die im Bild erfassten Kontraste gegeben ist. Daher werden im Folgenden allgemeine Begriffe und Abhängigkeiten der Stereoskopie und der Bildqualität behandelt. Insbesondere werden Aspekte zur Höhenauflösung und der Einfluss der endlichen Schärfentiefe eines optisch abbildenden Systems auf die 3D-Messung betrachtet. Im Speziellen wird in Kapitel 6.1, aufbauend auf den hier behandelten Inhalten, eine verallgemeinerte Betrachtungsweise der Schärfentiefe ausgearbeitet. Im Zusammenspiel mit lokalen 3D-Rekonstruktionsalgorithmen und deren Suchfenstergröße kann die Schärfentiefe in Abhängigkeit der auf dem Objekt auftretenden Modulationsfrequenzen betrachtet werden. Verfahren zur Qualifizierung der Längenmessgenauigkeit von auf Triangulation basierenden Systemen sind von Luhmann und Wendt [2000] diskutiert worden. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch nicht die erreichbare Längenmessgenauigkeit diskutiert, sondern insbesondere die Abhängigkeit des Messrauschens von der Bildqualität.

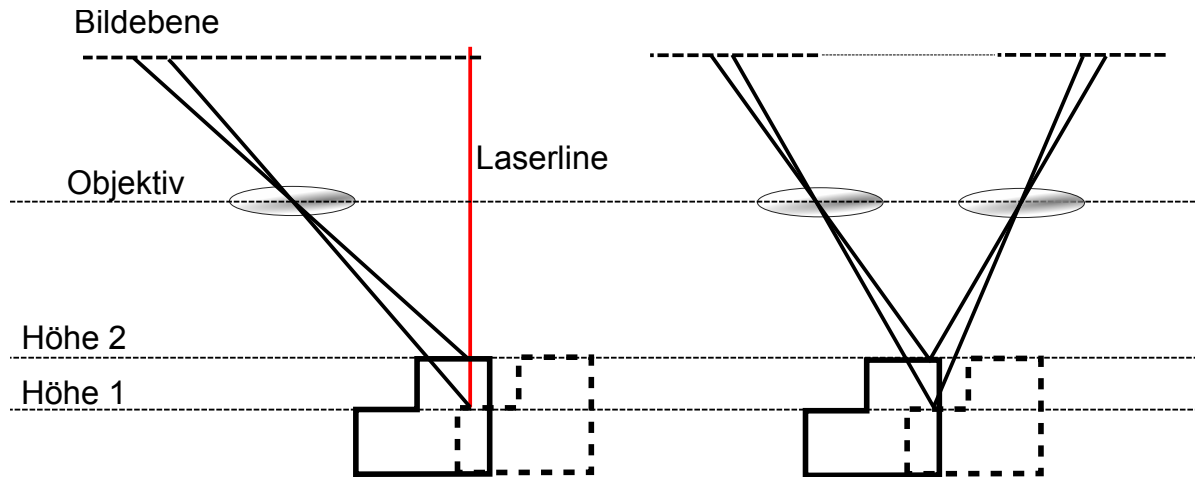


Abbildung 16: Schematisch dargestellt sind zwei etablierte Realisierungsformen von optischen Messgeräten, welche mittels Trigonometrie die Bestimmung von Oberflächentopografien ermöglichen. Auf der linken Seite ist das (aktive) Laser-Lichtschnittverfahren dargestellt. Hier wird eine Laserlinie auf die Objektoberfläche projiziert und mit einer Kamera unter einem Winkel die Lage der Linie erfasst. Die gemessene Position der Laserlinie im Bild ermöglicht, über einfache Winkelbeziehungen die Höhe der Objektoberfläche zu bestimmen. Auf der rechten Seite wird das Dreieck zur Trigonometrie aus den abbildenden Strahlenbündeln von zwei Kameras aufgespannt (passives Verfahren).

Die behandelte Stereo-Farbzeilenkameras besteht aus zwei Zeilensensoren und zwei Optiken (siehe Abbildung 17), welche im Produktionsprozess möglichst präzise aufeinander justiert werden. Hierbei muss der dreidimensionale Erfassungsraum beider Teilkameras mit hoher Genauigkeit aufeinander ausgerichtet werden, um den Höhenmessbereich des Systems zu maximieren und gleichermaßen das Messverfahren robust gegen äußere Einflüsse zu gestalten. Die hierzu benötigten Mess- und Auswertverfahren werden im Folgenden ausgearbeitet. Über das Bildfeld und die Schärfentiefe werden hierzu die Modulationstransferfunktionen (*MTF*) beider Teilkameras abgeglichen. Verbleibende Diskrepanzen der Teilkameras zueinander werden durch eine anschließende Kalibrierung des 3D-Kamerasystems erfasst und in der nachfolgenden Datenverarbeitung im Verarbeitungsschritt der Rektifizierung durch eine geometrische Korrektur mit eingebunden.

Die grundlegenden Prinzipien der Triangulation können fast beliebig auf verschiedene Abbildungsmaßstäbe übertragen werden. Derzeit sind Systeme mit optischen Auflösungen im mikroskopischen Bereich mit $Res_{min} = 2.5 \mu\text{m}/\text{Px}$ bis hin zu großen makroskopischen Systemen mit Auflösungen von $Res_{max} = 600 \mu\text{m}/\text{Px}$ durch die *Chromasens GmbH* realisiert worden. Entsprechend der jeweiligen Applikation werden die Kamerasysteme ausgelegt und gefertigt. Die grundlegenden optischen und messtechnischen Gesetzmäßigkeiten sind jedoch unabhängig vom Abbildungsmaßstab vergleichbar, da diese im Wesentlichen auf der Geometrie der optischen Abbildung und der optischen Abbildungsqualität der Teilkameras basieren. In Kapitel 6, welches sich mit der Datenanalyse beschäftigt, wird ohne Einschränkung der Allgemeinheit bevorzugt eine Kamera mit einer optischen Auflösung von $5 \mu\text{m}/\text{Px}$ in Detail analysiert, da diese hinsichtlich einiger zukunftsweisenden Applikationen von großem Interesse ist. Diese Kamera wird unter anderem zur Inspektion von Halbleiterbauelementen, Elektronikkomponenten, Leiterplatten, Gitteranordnungen von Lotkugeln, Bonddrähten und zur Bauteilprüfung im Herstellungsprozess von Mobiltelefonen eingesetzt.

Eine weitere Stärke der Zeilenkamerasysteme liegt in der zeilenweisen Erfassung der Objekte (siehe Abbildung 7). Hierdurch ist die Bildgröße nur in der Richtung des Sensors limitiert. In der Raumrich-

tung des Transportes ist die Bildgröße lediglich beschränkt durch den mechanischen Transport und den verfügbaren Speicherplatz. Somit ist das Aneinanderfügen der Bilddaten im Falle ausgedehnter Objekte nur in einer Raumrichtung notwendig, was weiterhin den Rechenaufwand und somit die damit verbundene Rechenzeiten positiv beeinflusst. Hier gelten im Vergleich zu Matrixkamarasystemen dieselben Argumente hinsichtlich der Vorteile der erreichbaren Messgenauigkeit - und Reproduzierbarkeit bedingt durch den Einsatz von Zeilenkameras, wie sie schon im Falle der multispektralen Zeilenkamera angeführt wurden. Jegliche räumliche Kalibrierung sowie die Stabilisierung der Beleuchtung und des Sensorsignals muss lediglich entlang einer Raumdimension vorgenommen werden. Zur Stabilisierung der Messdaten in Transportrichtung muss die zeitliche Reproduzierbarkeit der Messdaten sichergestellt werden. Wesentliche Vorteile von Matrixkamarasystemen sind die geringeren Kosten für die Sensoren und die geringeren Anforderungen an das mechanische Transportsystem. Für die Bilderfassung mit einer Matrixkamera ist kein präziser Transport des Objektes oder der Kamera notwendig, da zum Zeitpunkt der Bilderfassung das Objekt und die Kamera fixiert werden. Einige hier vorgestellten Ansätze lassen sich auf einfache Art und Weise auf Matrixkamarasysteme verallgemeinern, andere Argumentationen und Ableitungen gelten hingegen lediglich für Stereo-Zeilenkamarasysteme. Im Folgenden werden die grundlegenden optogeometrischen Zusammenhänge der stereoskopischen 3D-Messung betrachtet.

2.3.2 Triangulation - das Stereoprinzip

In diesem Kapitel werden die allgemeinen Prinzipien der stereoskopischen Gewinnung von dreidimensionalen Bilddaten behandelt. Die Funktionsweise basiert auf rein geometrischen Gegebenheiten. Ein Punkt auf dem zu vermessenden Objekt wird aus zwei Betrachtungswinkeln optisch abgebildet. Die relative Bildverschiebung desselben Bildpunkts in beiden Teilkameras (Disparität D) beinhaltet implizit die Information über den Abstand des Objektpunktes zur Kamera. Diese Messtechnik, bzw. das Messverfahren wird allgemein auch als Triangulation bezeichnet [Jähne, 2012], da durch die Bildverschiebung beider Teilkameras zwei Winkel bekannt sind. Der Abstand des erfassten Objektes zur Kamera ergibt sich aus dem Schnittpunkt der beiden Strahlen der Teilkameras.

Das grundlegende Verständnis der stereoskopischen Bilderfassung, bzw. der Triangulation, wurde schon vor fast 200 Jahren anhand der physiologischen dreidimensionalen Wahrnehmung entwickelt. Wheatstone [1838] untersuchte die dreidimensionale visuelle Wahrnehmung des Menschen. Er begründet die Fähigkeit, Objekte in drei Dimensionen visuell zu erfassen, durch die verschiedenen Betrachtungswinkeln beider Augen. Liegen die betrachteten Objekte weit entfernt vom Beobachter, fallen die optischen Achsen beider Augen näherungsweise zusammen, da mit wachsendem Abstand zwischen Beobachter und Objekt der Winkel zwischen den Betrachtungsrichtungen immer kleiner wird.

Im Zuge der Entwicklung der analogen Fotografie wurden die ersten stereoskopischen Kameras in den 50er Jahren des neunzehnten Jahrhunderts entworfen. Die Motivation hierfür lag allerdings nicht in der Messtechnik, sondern in der Unterhaltung und der Faszination der Anwender [Hannavy, 2013, S.256]. Die stereoskopischen Bildpaare wurden durch Stereoskope betrachtet um dem Beobachter einen dreidimensionalen Eindruck der Bildinhalte zu ermöglichen. Durch diese Erkenntnisse wurde der Grundstein für die technologischen Entwicklungen der letzten Jahrzehnte gelegt. Auf Basis der zunehmenden Rechenkapazitäten kommerzieller Systeme können auf Triangulation basierende Messgeräte industrietauglich eingesetzt werden [Blais, 2004].

Im Folgenden werden die geometrischen Verhältnisse des Stereosystems in einem stark vereinfachten Modell behandelt, welches aus einer Anordnung von zwei Lochkameras besteht. Dem Modell der Lochkamera liegt zugrunde, dass sich alle Strahlen des abbildenden Systems in exakt einem Punkt schneiden, namentlich dem Projektionszentrum. Vernachlässigt werden hierbei jegliche Abbildungsfehler und Limitierungen, gegeben durch die Wellennatur des Lichtes. Diese treten zwar in jedem realen optisch abbildenden System auf und bestimmen bzw. limitieren die hier erreichbare messtechnische Bildqualität und somit die Messgenauigkeit. Zur einfacheren, modellhaften Darstellung werden sie jedoch außer Acht gelassen. Zu den Abbildungsfehlern zählen die optische Verzeichnung, die Beugung an der opti-

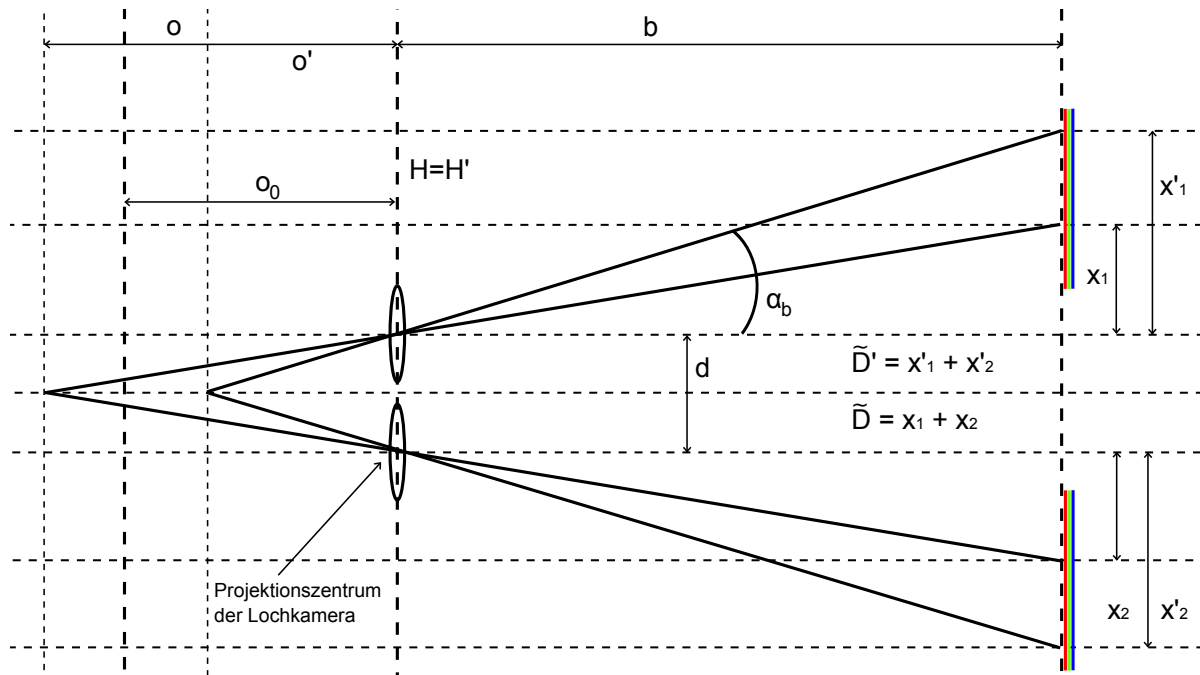


Abbildung 17: Dargestellt ist die Geometrie des Stereoprinzips im stark idealisierten Fall zweier Lochkameras. Punkte auf dem Objekt bei verschiedenen Abständen zur Kamera (o und o') führen zu unterschiedlichen Abständen der korrespondierenden Bildpunkte in der Sensorebene (\tilde{D} und \tilde{D}'). Rückt der Objektpunkt näher zur Kamera, steigt die gemessene Disparität: $o < o' \rightarrow \tilde{D} > \tilde{D}'$. x_1 und x_2 bezeichnen die Verschiebung des Bildpunktes relativ zur optischen Achse der Teilkameras 1 und 2. Liegen die Werte x_1 der Teilkamera 1 oberhalb der optischen Achse sind diese positiv, unterhalb negativ. Aufgrund der Spiegelsymmetrie der Teilkameras gilt bei Teilkamera 2 der invertierte Sachverhalt.

schen Apertur, Farbfehler entlang und quer zur optischen Achse, sowie die Bildfeldwölbung verursacht beispielsweise durch sphärische Aberrationen. Die ideale Lochkamera soll hier als Ausgangspunkt für die geometrischen Grundlagen des Systems dienen. Die realen Fehler und deren Auswirkungen auf das Messsystem werden in den darauf folgenden Ausführungen behandelt.

Durch rein geometrische Überlegungen kann im vereinfachten Fall der idealen Lochkameras abgeleitet werden, dass die Disparität \tilde{D} wie folgt berechnet werden kann [Luhmann, 2010]:

$$\tilde{D} = \frac{d \cdot b}{o} = d \cdot m \quad (28)$$

Wobei entsprechend Abbildung 17 der Basisabstand d der Objektive zueinander ist. b ist die Bildweite, also der Abstand zwischen der bildseitigen Hauptebene H' und dem Sensor. o bezeichnet die Objektweite, also den Abstand zwischen der objektseitigen Hauptebene H und dem Objekt. $m = b/o$ ist der Abbildungsmaßstab des abbildenden Systems. Hier ist erkennbar, dass die gemessene Disparität des Stereosystems linear zum Abbildungsmaßstab m und dem Basisabstand der Objektive d ist. In der praktischen Anwendung macht es Sinn, nicht mit der absoluten Objektweite und mit der absoluten Disparität zu arbeiten, sondern Änderungen relativ zu einer Bezugsebene zu betrachten. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Kameras in der Referenz-Objektweite o_0 geometrisch aufeinander abgeglichen werden. Die Referenz-Objektweite o_0 zeichnet sich weiterhin dadurch aus, dass hier die Stereokamera die beste Bildqualität aufweist (Details werden in Kapitel 2.3.3 diskutiert). Hierbei werden einerseits die Sensoren so exakt wie möglich auf ein gemeinsames Objektfeld justiert, verbleibende Fehler werden im Verarbei-

tungsschritt der Rektifizierung rechnerisch kompensiert. Somit kann man die relative Disparität D für Oberflächen in der Ebene $o = o_0$ identisch Null setzen. Somit kann geschrieben werden:

$$\Delta o = o_0 - o = \frac{d \cdot b}{\tilde{D}_0} - \frac{d \cdot b}{\tilde{D}} = d \cdot b \frac{\tilde{D} - \tilde{D}_0}{\tilde{D}_0 \cdot \tilde{D}} = d \cdot b \frac{D}{\tilde{D}_0(D + \tilde{D}_0)} \quad (29)$$

Hierbei gilt $D = \tilde{D} - \tilde{D}_0$. D beschreibt also die Änderung der Disparität relativ zur Bezugsebene im Abstand o_0 mit der Disparität \tilde{D}_0 . Im praktischen Fall macht diese Formulierung Sinn, da beide Kameras so aufeinander justiert werden, dass im Falle der optimalen Abbildungsleistung, die Bildverschiebung beider Teilkameras gemessen im Bezugssystem der beiden Sensoren näherungsweise Null ist. Es gilt daher bei $D(o = o_0) \approx 0$. Es wird eine ebene Objektoberfläche, welche in der optimalen Objektweite o_0 liegt, mit der Disparität $D_0 = D(o = o_0) \approx 0$ gemessen. Daher kann sichergestellt werden, dass im Zentrum des Messbereichs die Erfassungsbreite, und damit einhergehend das messtechnisch erfasste Volumen, maximiert wird.

Es wurde bewusst notiert, dass die Disparität nur näherungsweise Null ist, da durch die Verzeichnung der Objektive und die in der Praxis auftretende Toleranz der Justage der Kameras zueinander, der ideale Fall $D(o = o_0) = 0$ nicht durch wirtschaftlich vertretbaren technischen Aufwand erzielt werden kann. Die verbleibende Restabweichung wird im Kalibrierverfahren präzise vermessen und durch die nachfolgende Bildverarbeitung im Schritt der Rektifizierung kompensiert. Details werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

Die absolute Disparität $\tilde{D}_0 = \tilde{D}(o = o_0)$ ist also eine Konstante, gegeben durch die Geometrie des Systems. Berechnet, beziehungsweise gemessen wird im System die relative Disparität D , welche direkt den Rückschluss auf die Änderung δo relativ zur Bezugsebene des Messsystems zulässt und durch zwei Messungen auf einem Objekt die Bestimmung absoluter Höhenunterschiede erlaubt.

Aus den meisten Applikationen heraus besteht die konkrete technische Anforderung an eine Höhenauflösung des Systems. Daher betrachten wir anhand einer *Taylorentwicklung* der Disparität \tilde{D} (Gleichung 28) um die Stelle \tilde{D}_0 in Abhängigkeit des Abstandes des Objektes zur Kamera o :

$$\tilde{D}_0 + \delta D = \frac{d \cdot b}{0! \cdot o_0} - \frac{d \cdot b}{1! \cdot o_0^2} \delta o + \mathcal{O}(\delta o^2) \quad (30)$$

$$\delta D = -\frac{d \cdot b}{o_0^2} \delta o + \mathcal{O}(\delta o^2) \approx -\frac{m \cdot d}{o_0} \delta o \quad (31)$$

Folglich ergibt sich aus der kleinsten messbaren Disparität δD_{min} , dem Abbildungsmaßstab m , dem Basisabstand d und der Objektweite o_0 der kleinste auflösbare Höhenunterschied δo . Da in der Regel vor der Entwicklung und Auslegung eines Systems durch die Applikation die Höhenauflösung und die optische Auflösung definiert sind, muss entsprechend der Anforderungen die abbildende Optik spezifiziert werden. Ein erster Anhaltspunkt kann hier abgeleitet werden, indem die Objektweite über die Abbildungsgleichung [Litfin, 2005, S.27]

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{o} \quad (32)$$

und der Maßstab m

$$m := b/o \quad (33)$$

in Gleichung 31 eingesetzt werden:

$$\frac{\delta D}{\delta o} = -\frac{m \cdot d}{o_0} = -\frac{m^2 \cdot d}{f \cdot (m + 1)} \quad (34)$$

In Gleichung 34 sind nun die relevanten Parameter zur Auslegung eines stereoskopischen Kamerasystems erkenntlich. Die Höhenauflösung, hier definiert als $\delta D / \delta o$, ist proportional zum Abbildungsmaßstab m und zum Basisabstand d , sowie umgekehrt proportional zur Brennweite der eingesetzten Optik f . Es gilt nun eine möglichst ideale Lösung hinsichtlich der variablen Systemparameter zu finden. Ist die optische Auflösung durch die aufzulösenden Strukturen auf dem zu inspizierenden Objekt definiert, gilt es die Brennweite und den Basisabstand anzupassen. Nach Gleichung 34 sollte die Brennweite so klein wie möglich und der Basisabstand so groß wie möglich gewählt werden. Eine kleine Brennweite, bei gegebenem Bildfeld führt zwangsweise zum Einsatz von Weitwinkelobjektiven (halber Bildwinkel $\alpha_b \gg 20^\circ$, siehe Abbildung 17). Dies führt in der Regel entweder zu dramatischen Einbußen bei der Bildqualität oder zu sehr viel höheren Kosten der Objektive. Die meisten Weitwinkelobjektive zeigen eine sehr starke Verzeichnung, sowie einen starken Abfall der Beleuchtungsstärke (Vignettierung) und der MTF hin zum Bildrand. Weitwinkelobjektive, welche geringe Einbußen hinsichtlich der Abbildungsqualität zeigen, sind aus einer Vielzahl von einzelnen Linsen aufgebaut, wobei auch asphärische Oberflächen eingesetzt werden. Beide Faktoren treiben die Herstellungskosten der Objektive in die Höhe. Eine beliebige Vergrößerung des Basisabstandes ist nicht möglich, da auch hierfür der Bildwinkel im Stereonormalfall weiter vergrößert werden muss. Eine Vergrößerung der Betrachtungswinkel zur Verbesserung der Höhenauflösung kann auch aufgrund der auftretenden Abschattungen durch Stufen auf dem Objekt nicht beliebig weit getrieben werden.

In der Regel ist die Brennweite bei hochqualitativen Objektiven somit durch den notwendigen Bilddurchmesser bestimmt, welcher wiederum durch den eingesetzten Sensor definiert wird. Bei den in Kapitel 6 analysierten Systemen werden RGB-Zeilensensoren mit 7300 Pixeln eingesetzt, wobei die Kantenlänge der Pixel $l_{px} = 10 \mu m$ beträgt. Der Bilddurchmesser des Objektives muss daher mindestens $73 \text{ mm} + m \cdot d/2$ betragen. Es werden daher im Falle $m \ll 1$ Objektive mit Brennweiten $f \approx 100 \text{ mm}$ eingesetzt.

Die Leistungsfähigkeit eines Messsystems ist maßgeblich durch den dynamischen Bereich (englisch: *dynamic range*) definiert, welcher durch das Verhältnis zwischen Höhenmessbereich Δo_{max} und Höhenmessrauschen σ_z gegeben ist:

$$DR_z = \frac{\Delta o_{max}}{\sigma_z} \quad (35)$$

Wobei Δo_{max} der Höhenbereich ist, in welchem die 3D-Zeilenkamera verlässliche Messwerte der Topografie liefern kann. Der Höhenmessbereich ist bei einer optischen Abbildung durch die objektseitige Schärfentiefe gegeben, welche daher im Folgenden näher behandelt wird. Messtechnisch muss betrachtet werden, wo das Limit für die Bestimmung der Disparität liegt, um eine Aussage über die absolute Höhenauflösung treffen zu können. Insbesondere wird erläutert, wie sich im Zusammenhang mit lokalen 3D-Rekonstruktionsalgorithmen die Schärfentiefe als eine frequenzabhängige Größe erfassen lässt. Der Unschärfekreis, verursacht durch die Defokussierung, wird im Zusammenhang mit der Suchfenstergröße der lokalen Rekonstruktionsalgorithmen untersucht. Als Grundlage hierzu wird nun die *MTF* betrachtet.

2.3.3 MTF - das abbildende Objektiv als analoger 2d-Filter

Die Modulationstransferfunktion (*MTF*) ist bei der Auslegung einer Stereo-Zeilenkamera von essentieller Bedeutung. Wie im Folgenden näher behandelt, beschreibt die *MTF* die von der Kamera erfassbare Bildinformation. Auf Basis dieser Bildinformation, beziehungsweise der Kontrastmodulation im Bild, bestimmen die Algorithmen die Disparität D . Die *MTF* entspricht dem Betrag der komplexen Filterfunktion, welche ein reales optisch abbildendes System mit sich bringt. Eine abbildende Optik mit idealer *MTF* überträgt jede auftretende Frequenz auf dem Objekt auftretender Kontraste verlustfrei auf die Bildebene. Eine solche optische Abbildung, welche alleinig durch Verzeichnung negativ beeinflusst wird, lässt sich eindeutig invertieren. Somit ist durch die optische Abbildung die gesamte Information über

die auf dem Objekt vorhandenen Modulationen erhalten. In einem realen optischen System kommt es aufgrund verschiedener Einflüsse, insbesondere bei hohen Frequenzen, zu einem Informationsverlust. Im allgemeinen Sprachgebrauch spricht man von einer geringeren 'Schärfe' des Bildes. Im Ortsraum des Objektes und des Bildes lässt sich der Informationsverlust, beziehungsweise die Tiefpassfilterwirkung, über eine Faltung beschreiben:

$$\begin{aligned} B'(x, y) &= p_b(x, y) * B(x, y) \\ O'(x, y) &= p_o(x, y) * O(x, y) \end{aligned} \quad (36)$$

Hier ist $p_b(x, y)$ die Filterfunktion im Bildraum, $p_o(x, y)$ entspricht der Filterfunktion im Objektraum. $B(x, y)$ und $O(x, y)$ beschreiben die ideale, also ungestörte Helligkeitsverteilung oder auch Kontrastfunktion im Bild- und Objektraum. Die gestrichelten Größen bezeichnen die durch die Filterwirkung des optischen Systems veränderte Kontrastfunktion. Durch das lineare Verhalten des Systems kann gedanklich die Filterwirkung auf das Objekt oder das Bild angewendet werden. In einem realen optischen System (beispielsweise ein Objektiv) ist die Übertragungsfunktion maßgeblich durch die optischen Oberflächen der Teilkomponenten gegeben. Die Ausbreitung der Wellenfront in einem optischen System wird mittels der Fourieroptik numerisch behandelt und simuliert, um die einzelnen Grenzflächen, zum Beispiel eines abbildenden Objektives, zu optimieren. In diesem Zusammenhang lässt sich das quantitative Verhalten einer solchen optischen Filterfunktion im Frequenzraum besser verstehen. Im Frequenzraum entspricht, nach dem Faltungstheorem, die Faltung einer einfachen Multiplikation der komplexen Filterfunktion \tilde{p}_b :

$$\tilde{B}'(\nu_x, \nu_y) = \tilde{p}_b(\nu_x, \nu_y) \cdot \tilde{B}(\nu_x, \nu_y) \quad (37)$$

Wobei die zweidimensionale Fouriertransformierte definiert ist durch:

$$\tilde{f}(\nu_x, \nu_y) = \int \int e^{-ix\nu_x} e^{-iy\nu_y} f(x, y) dx dy \quad (38)$$

Die Variablen $\nu_x = 1/\lambda_x$ und $\nu_y = 1/\lambda_y$ sind die Ortsfrequenzen, beziehungsweise die Wellenzahlen, korrespondierend zu den Richtungen x und y im Ortsraum der Bildebene. Entsprechend der Beziehung 37 wird die *MTF* definiert als der Betrag der komplexen optischen Filterfunktion (siehe beispielsweise Jähne [2012]):

$$MTF(\nu_x, \nu_y) = |\tilde{p}_b(\nu_x, \nu_y)| \quad (39)$$

Bei der Messung und der Berechnung der *MTF* wird zwischen der meridionalen und der sagittalen Komponente unterschieden. Naheliegender ist es, die x -Achse des Koordinatensystems parallel zu dem Zeilensensor zu legen. In dem konkreten Fall ist die meridionale (x) Komponente identisch mit der Richtung des Zeilensors. Die sagittale (y) Komponente liegt hingegen senkrecht zum Sensor, also in Transportrichtung. Es findet sich auch die Bezeichnung angelehnt an der Ausrichtung der Testmuster. Zur Bestimmung der meridionalen Komponente der *MTF* sind die Testlinien tangential zur Rotations-symmetrie der Linse angeordnet. Im Falle der Messung der sagittalen Komponente sind die Linien des Testmusters hinsichtlich der optischen Achse radial orientiert (siehe Abbildung 18). Die Unterscheidung der Raumrichtungen der *MTF* ist insbesondere bei Objektiven relevant, die einen nicht zu vernachlässigenden Astigmatismus aufweisen. Hierbei zeigen beim schiefen Einfall vertikale und horizontale Strahlenbündel eine ideale Fokussierung bei verschiedenen Bildweiten. Daher sind in einer festen Bildebene Unterschiede der beiden Komponenten der *MTF* durch die verschiedenen Zerstreuungsradien unvermeidbar.

Die Ortsfrequenzen ν können entweder auf die Bild- bzw. die Sensorebene, oder auf die Objektebene bezogen werden. Objektive können über einen Bereich von verschiedenen Abbildungsmaßstäben eingesetzt werden, weswegen meistens die *MTF* bezogen auf die sensorseitigen Ortsfrequenzen angegeben wird. Diese Herangehensweise ist weiterhin praktikabel, da für eine spezielle Optik die Auflösung des Sensors, also die Kantenlänge der einzelnen Pixel, nicht fest definiert ist. Um die resultierende Auflösung

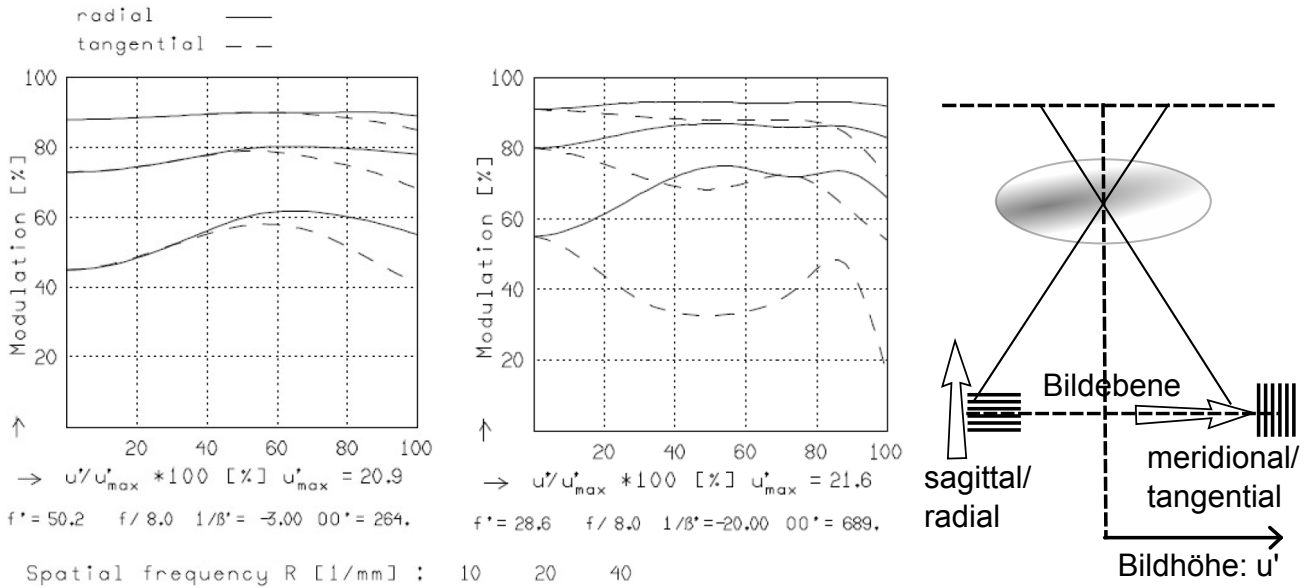


Abbildung 18: Auf der linken Seite und in der Mitte sind Beispiele von *MTF*-Daten aus Datenblättern von Objektiven zu sehen (entnommen aus SchneiderKreuznach [2016]). Aufgetragen ist jeweils die *MTF* über die Bildhöhe u' (Position auf dem Sensor) bis $u' = u'_{max}$. Die verschiedenen Kurven korrespondieren zu den Frequenzen von $\nu = 10, 20, 40$ 1/mm. Die höchste Frequenz entspricht einer Wellenlänge von $\lambda = 25 \mu\text{m}$. Auf der rechten Seite sind die Raumrichtungen der *MTF* dargestellt. Die Bezeichnung 'tangential' bezieht sich auf die tangentielle Ausrichtung des Linienmusters. Diese liegt senkrecht auf der meridionalen Ebene, welche durch die optischen Achse und den Objektpunkt aufgespannt wird. Der linke Datensatz zeigt das Verhalten eines typischen Objektivs (*Componon 2.8/50*) mit geringem Astigmatismus. Daher sind die sagittale und die meridionale Komponente der *MTF* nahezu identisch. Die mittlere Grafik zeigt die *MTF*-Daten eines Weitwinkelobjektivs (*Xenon Emerald 2.8/28*), welches eine höhere Abweichungen der beiden räumlichen *MTF* Komponenten aufweist und somit auch einen nicht zu vernachlässigenden Astigmatismus.

auf dem Objekt abzuleiten, muss lediglich der Abbildungsmaßstab angewendet werden. Die Kantenlänge der Pixel l_{px} definiert hier die Nyquistfrequenz, da das Pixelraster der Abtastung des analogen Bildsignals entspricht. In Abbildung 18 sind zwei Beispiele von *MTF*-Kurveverläufen aus typischen Datenblättern von Objektiven gezeigt.

Aufgetragen wird hier über die halbe Bildhöhe, ausgehend von der optischen Achse, der Verlauf der *MTF*. Die verschiedenen Kurven korrespondieren zu unterschiedlichen Frequenzen. Die durchgezogenen und die gestrichelten Kurven unterscheiden die sagittale und meridionale Komponente. Aufgrund der Rotationssymmetrie der Optik bestimmen diese Kurven das vollständige optische Übertragungsverhalten des jeweiligen Objektivs. Diese Daten werden meist durch Optiks Simulationen bestimmt und entsprechen daher einem idealen Objektiv in dem Sinne, dass fertigungstechnische Toleranzen hier meist nicht vollständig mit berücksichtigt werden. Aus diesem Grund können solche Daten meist nur als orientierende Werte herangezogen werden.

2.3.4 Abbildungsfehler, Rektifizierung und die Epipolargeometrie

Eine geometrisch ideale Stereo-Zeilenkamera zeichnet sich dadurch aus, dass auf beiden Zeilensensoren durch die beiden Optiken die identische, also im Bildkoordinatensystem örtlich deckungsgleiche Abbildung des Objektes zum liegen kommt. Dies entspricht einer idealen geometrischen Ausrichtung beider Objektive und Sensoren zueinander. In diesem Fall wäre gewährleistet, dass bei der Suche nach Korrespondenzen der Bildinhalte, beziehungsweise der Disparitäten, exakt entlang derselben Bildzeile des zweiten Bildes gesucht werden muss. Dieser ideale Fall liegt vor, wenn die Epipolarebene parallel zur Ausrichtung der Pixel des Sensors liegt (siehe Abbildung 19). Diese Randbedingung kann aufgrund der endlichen Toleranzen im Justage- und Montageprozess nicht mit vertretbarem Aufwand ideal erfüllt werden. Daher erweist es sich als pragmatisch durch eine Transformation der Bilddaten sicher zu stellen, dass die Epipolarebene parallel zum Pixelraster des Sensors zu liegen kommt. Dieser Rechenschritt wird allgemein als Rektifizierung bezeichnet.

Im Falle von Zeilensensoren hat sich im Rahmen der Analyse der relativen Verschiebung der Bildinhalte beider Teilkameras zueinander gezeigt, dass die Sensoren eine endliche Biegung aufweisen können, welche keinesfalls durch die Justage korrigiert werden kann. Alleinig diese Tatsache führt zu der Notwendigkeit die verbleibende Bildverschiebung in der Bildverarbeitung zu kompensieren. Zusätzlich entsprechen im vereinfachten Konzept die beiden idealen Kameras dem Modell einer Lochkamera, was bei einer perfekten parallelen Ausrichtung beider Sensoren zur Referenzobjektebene zur Folge hat, dass der Abbildungsmaßstab über das gesamte Bildfeld konstant ist. Liegen die Projektionszentren beider Lochkameras auf einer Parallelen zur Objekt- und zur Bildebene, sind außerdem die Abbildungsmaßstäbe beider Kameras identisch. Durch optische Abbildungsfehler entstehen jedoch in einem realen Kamerasystem geometrische Abweichungen, welche charakterisiert und kompensiert werden müssen. Bei sehr hochqualitativen Objektiven können die Abbildungsfehler auf einem stark eingegrenzten Bildfeld sehr gering ausfallen, was somit einer guten Näherung einer Lochkamera entspricht. Es können jedoch die geometrischen Abbildungsfehler, verursacht durch die ortsabhängige Verzeichnung, nicht vernachlässigt werden. Prinzipbedingt müssen bei Stereokameras, im Falle der parallelen Anordnung von Objekt und Sensor (Stereonormalfall), die Bildfelder beider Objektive stark asymmetrisch ausgenutzt werden. Das dadurch größere genutzte Bildfeld, führt somit insbesondere am Rand der Bildfelder, zu höheren Abbildungsfehlern. Hierbei sind insbesondere zu nennen:

- Optische Verzeichnung (kontinuierliche Änderung des Abbildungsmaßstabes) durch beispielsweise sphärische Aberrationen.
- Maßstabsabweichungen durch Montage- und Brennweitentoleranzen.
- Rotation und Verschiebung des Sensors durch Montagetoleranzen.
- Farbquer- und Farblängsfehler verursacht durch die Dispersion der optischen Gläser.

Die messtechnischen Untersuchungen (Kapitel 6) werden zeigen, dass unter idealen Laborbedingungen auf einem stark strukturierten Objekt das Rauschen der gemessenen Disparität etwa $1/10\text{ px}$ beträgt. Somit macht es Sinn, bei der absoluten Korrektur der geometrischen Abbildungsfehler eine Präzision in einer vergleichbaren Größenordnung anzustreben. Hierbei zeigt sich die Komplexität der grundlegenden Problematik in der vollständigen Kette der Bestimmung und der Anwendung der Parameter der Kalibrierung. In der vollständigen Toleranzkette müssen die folgenden Einflüsse betrachtet werden (die Gleichungen in der Klammer zeigen die besten Toleranzschätzungen):

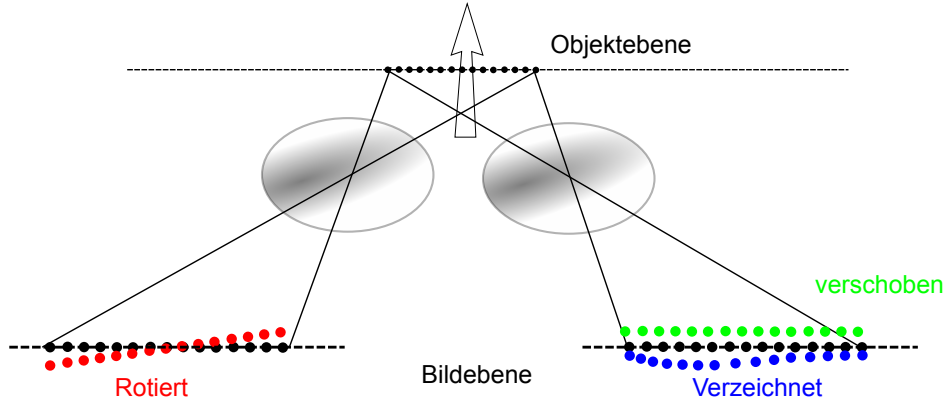


Abbildung 19: Ideale äquidistante Objekte (hier Kreise in der Objektelebene) werden durch die Objektive auf die Sensoren abgebildet. Geometrische Abweichungen der optischen Abbildungen von der Epipolarbedingung sind maßgeblich gegeben durch optische Verzeichnung (blaue Punkte), Versatz der optischen Achsen sowie durch Versatz (grüne Punkte) und Rotation der Bildsensoren (rote Punkte).

- Laterale Positioniergenauigkeit der Referenzmarker ($\delta x y_{obj} \approx \pm 1 \mu\text{m} = \pm 0.5 \text{ px}$ bei $m = 5 \mu\text{m/px}$)
- Genauigkeit der auf Bildverarbeitung basierenden Positionsbestimmung der Referenzmarker ($\delta x y_{BV1} \approx \pm 1/10 \text{ px}$)
- Genauigkeit der Anwendung der Korrektur ($\delta x y_{BV2} \approx \pm 1/10 \text{ px}$)
- Ebenheit der Oberfläche des Referenzobjektes ($\delta z_{obj} \pm 5 \mu\text{m}$)

Die Fehler der lateralen Positionierung, Bestimmung und Korrektur der Referenzmarker lassen sich über die Höhenauflösung des Systems (siehe Gleichung 34) in einen Höhenfehler übersetzen. Der gesamte laterale Fehler summiert sich auf, da hier eine einfache lineare Abhängigkeit besteht:

$$\delta xy = \delta x y_{obj} + \delta x y_{BV1} + \delta x y_{BV2} \approx (0.5 + 0.1 + 0.1) \text{ px} = 0.7 \text{ px} \quad (40)$$

Dieser Schätzwert der Toleranzen der lateralen Bildkorrekturen lässt sich mit Gleichung 34 in einen absoluten Höhenmessfehler übertragen. Allerdings muss hierzu die genaue Systemgeometrie bekannt sein. Als Beispiel können wir das im Folgenden messtechnisch behandelte 3D-Kamerasystem betrachten. Dieses hat eine Höhenauflösung von $Res_z = \delta D / \delta o = 90 \text{ px/mm}$. Somit führt der laterale Fehler δxy zu einem Höhenmessfehler von $\delta z_{xy} = \delta xy / Res_z \approx 0.008 \text{ mm} = 8 \mu\text{m}$. Die gesamte zu erwartende Messabweichung ergibt sich nun aus der Summe der lateralen und der vertikalen Komponente:

$$\delta z = \delta z_{xy} + \delta z_{obj} = 13 \mu\text{m} \quad (41)$$

Für eine weitere Verbesserung der erreichbaren Genauigkeit der Kalibrierung müsste hier gleichermaßen das Referenzobjekt, sowie die verarbeitende Software optimiert werden. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass für die meisten Applikationen die Höhenauflösung und die damit zusammenhängende Möglichkeit, beispielsweise eine Änderung in einem laufenden Produktionsprozess analysieren zu können, wichtiger ist als die absolute Maßhaltigkeit eines Objektes.

Zusätzlich zu diesen rein geometrischen Abweichungen kommt es weiterhin zu Veränderungen der *MTF* über das Bildfeld. In der Regel fällt die *MTF* hin zum Rand des Bildfeldes ab. Dieser Effekt wird, ebenfalls wie die Verzeichnung durch sphärische Aberrationen, dominiert. Eine Linse, deren Oberflächen der Teilfläche einer Kugel entspricht, bildet optisch eine ebene Oberfläche nicht auf eine Ebene

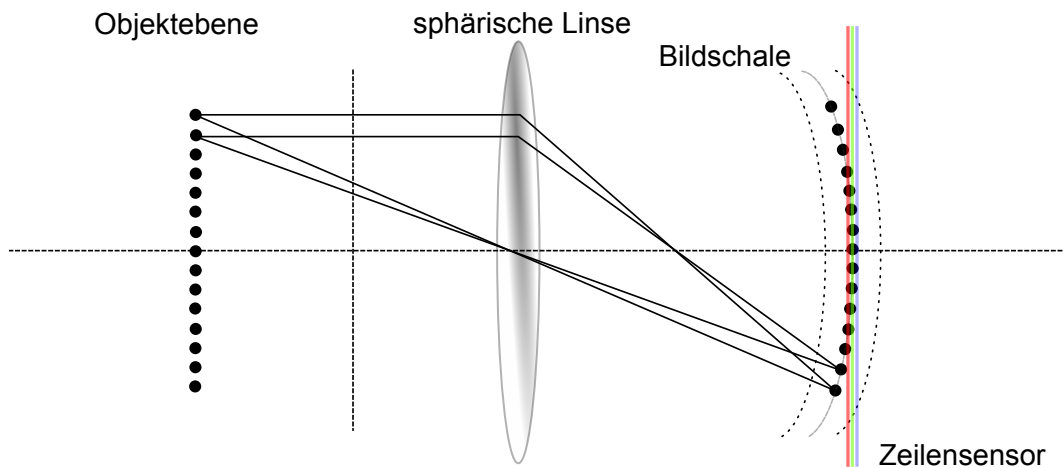


Abbildung 20: Die Abbildung einer Ebene durch eine sphärischen Linse liegt auf keiner Ebene, sondern näherungsweise auf einer Kugelschale. Durch den Einsatz eines ebenen Bildsensors kann die ideale Abbildungsleistung nicht über die gesamte Ausdehnung des Sensors sicher gestellt werden. Zum Rand hin kommt es durch die Bildfeldwölbung und den damit ansteigenden Zerstreuungskreis durch eine zunehmende Defokussierung zu Verlusten der *MTF*.

ab, sondern ebenfalls auf eine gekrümmte Oberfläche. Somit ist das durch einen ebenen Bildsensor erfasste Bild zum Rand hin weniger scharf abgebildet, da hier der Zerstreuungskreis der Strahlenbündel bereits einen vergrößerten Durchmesser aufweist (siehe Abbildung 20). Hier wird zwischen Aberrationen, welche geometrische Auswirkungen auf das Bild haben, und Aberrationen, welche Verluste in der *MTF* mit sich bringen, unterschieden. Diese beiden Effekte unterscheiden sich entscheidend dadurch, dass eine geometrische Aberration, also insbesondere Abweichungen des optischen Abbildungsmaßstabes, eine Verschiebung der Bildinformation impliziert. Diese kann durch rein geometrische Korrekturen, also einem Verschieben und Verzerren der Bilddaten, korrigiert werden. Hingegen die Aberrationen, welche einen direkten Verlust in der optischen Übertragungsfunktion bedeuten, können nicht rechnerisch oder algorithmisch kompensiert werden. Der Grund liegt darin, dass durch die Tiefpasswirkung der verringerten *MTF* Informationen über das Objekt verloren gehen, welche nicht mehr aus den Bilddaten wiedererlangt werden können. Daher ist prinzipiell bei der optischen Auslegung eines Stereokamerasystems ein größeres Augenmerk auf den Verlauf der *MTF* zu legen. Gerade die hochfrequenten Anteile der Bild-Kontrastfunktion $B(x, y)$ ermöglichen eine präzise Vermessung der Disparitäten und somit der Höhe des betreffenden Punktes auf dem Objekt. Methoden zur Bestimmung des relativen Verlaufes der *MTF* und die Auswirkung der Verluste der *MTF* auf die Wiederholgenauigkeit der Messung werden in dem Kapitel 6 durch die Analyse von Messdaten näher betrachtet.

Klassische Verfahren zur Kalibrierung von Stereokameras separieren die notwendigen Korrekturen in zwei Anteile. In einem ersten Schritt wird die innere Orientierung der beiden Teilkameras bestimmt und korrigiert. Diese setzt sich im Allgemeinen zusammen aus der Verzeichnung, der Lage der optischen Achse relativ zum Sensor, sowie der Kamerakonstante, welche der Bildweite oder dem Abstand des theoretischen Projektionszentrums zum Sensor entspricht. In einem zweiten Schritt wird die äußere Orientierung des Systems abgeleitet. Diese setzt sich aus der räumlichen Anordnung beider Kameras zueinander und der relativen Lage des Stereosystems zum eingesetzten Referenzobjekt zusammen.

Die Praxiserfahrung hat gezeigt, dass diese aufwendigen Modelle im Falle hochauflösender Stereo-Zeilensensoren zu wenig robusten Ergebnissen führen. Der Grund liegt darin, dass eine große Anzahl von Modellparametern, welche Abhängigkeiten voneinander aufweisen, aus einem Bilddatensatz bestimmt werden müssen. Diese Modelle zeigen insbesondere ihre Vorteile, wenn unter der Berücksichtigung der Lage des Kamerasystems im Raum perspektivische Ansichten eines Objektes rechnerisch generiert wer-

den sollen. In der Literatur beschriebene Modelle und Verfahren [Luhmann, 2010] sind entwickelt und optimiert für Stereo-Matrixkamarasysteme mit moderaten Abbildungsmaßstäben $0 < m < 1/10$. Eine direkte Anwendung auf hochauflösende Zeilenkamarasysteme hat sich daher als nicht zielführend erwiesen. Eine alternative Herangehensweise wurde durch die *Chromasens GmbH* entwickelt, welche im Wesentlichen dieselben Korrekturen vornimmt. Wobei im Rahmen der alternativen Herangehensweise die Modellparameter nicht in einem komplexen Modell in Abhängigkeit zueinander gebracht werden, sondern separiert bestimmt und angewendet werden können. Hierbei steht allerdings weiterhin die Idee im Vordergrund, durch die Korrekturen eine Abbildung des Systems auf das Lochkameramodell zu gewährleisten. Hierzu wird ein ebenes Objekt mit äquidistanten Bildmarkern mit bekannter räumlicher Lage, welches im rechten Winkel zu den optischen Achsen des Systems steht, erfasst. Nun ist aus dem Modell der idealen (Loch-)Stereokamera bekannt, dass die optische Abbildung verzeichnungsfrei ist, also der Abbildungsmaßstab über das gesamte Bildfeld konstant ist. Um dieser Bedingung gerecht zu werden wird im ersten Schritt eine möglichst präzise Korrektur der Verzeichnung vorgenommen. Hierzu werden die Positionen der Bildmarker im Bild detektiert und deren Koordinaten ausgewertet und zur Korrektur herangezogen. Die Information, dass die Referenzebene im rechten Winkel zur Kamera steht, muss in dem Sinne eingebracht werden, dass beide Kameras auf die identische mittlere Auflösung korrigiert werden. Sind nach der Verzeichnungskorrektur die Auflösungen beider Teilkameras über das Bildfeld konstant aber nicht identisch, führt das zu einer linear ansteigenden Disparität. Das bedeutet, dass das Stereosystem diese Ebene relativ zur Kamera gekippt messen. In den klassischen Modellen entspricht der Abgleich der mittleren Auflösung der Kameras der Bestimmung der Kamerakonstanten, da im Lochkameramodell die Auflösung direkt an die Lage des Projektionszentrums geknüpft ist. Weiterhin wird die relative Rotation und die Bildverschiebung in beiden Bildachsen der Teilkameras vermessen und eine Kamera auf die andere abgeglichen. Die Bildverschiebung parallel zur Richtung des Zeilensensors entspricht einer Definition des Abstandes der Bildsensoren zueinander, da in der bekannten Referenzebene somit eingestellt wird, dass die relative, in den Bildern gemessene Disparität, Null ist. Die beiden Teilbilder sind also in der Referenzebene deckungsgleich.

2.3.5 Algorithmische Verfahren zur Rekonstruktion von Oberflächentopografien

In der Literatur werden eine Vielzahl von Verfahren zur Rekonstruktion von Oberflächentopografien auf Basis von Stereobildpaaren diskutiert [Gupta und Cho, 2010; Hermann und Klette, 2008; Hosni u. a., 2011; Lee u. a., 2013; Mei u. a., 2013; Peris u. a., 2012], wobei alle dieselbe Aufgabe erfüllen sollen. Ziel der Algorithmen ist es, für jeden einzelnen Bildpunkt der einen Teilkamera den korrespondierenden Bildpunkt der zweiten Teilkamera zu finden. Auf Basis dieser relativen Bildverschiebung kann anhand der diskutierten Geometrie der Stereokamera und der Kamerakalibrierung der Abstand des betreffenden Objektpunktes zur Kamera berechnet werden. Die grundlegende Aufgabenstellung ist einfach formuliert, jedoch zeigen sich die Herausforderungen bei der realen Umsetzung und Anwendung. Die Anforderungen an die Algorithmen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Genaues Auffinden von korrespondierenden Bildpunkten (Disparität), wobei die Genauigkeit besser als ein Pixel sein muss.
- Hohe Rechengeschwindigkeit, idealerweise echtzeitfähig hinsichtlich der Datenraten der hier eingesetzten Zeilenkameras ($160 \cdot 10^6$ Px/s)
- Unabhängigkeit von Beleuchtungsunterschieden, gegeben durch die verschiedenen Betrachtungswinkel der Teilkameras
- Hohe Reproduzierbarkeit (auf identischen und ähnlichen Bilddaten, aufgenommen von demselben Objekt)
- Parametrierbarkeit zur Optimierung hinsichtlich verschiedener Objekt- bzw. Bildeigenschaften

Grundlegend werden lokale und globale Algorithmen unterschieden. Die lokalen Algorithmen betrachten ein definiertes Umfeld eines einzelnen Pixels und vergleichen dieses mit dem Umfeld jedes möglichen korrespondierenden Pixels der zweiten Teilkamera. Bildinformationen außerhalb des definierten Fensters spielen hierbei keine Rolle. Hingegen suchen die globalen Algorithmen die optimalen Disparitäten simultan für jedes Pixel des gesamten Bildes. Es wird zu diesem Zweck eine globale Kostenfunktion aufgestellt, welche die Ähnlichkeit beider Teilbilder unter der aktuellen bestimmten Verschiebungstransformation, also entsprechend der bestimmten Disparitäten, darstellt [Yang, 2012]. Diese Herangehensweise entspricht dem physikalischen Konzept, dass ein System in ein energetisches Minimum relaxiert. Die Kostenfunktion kann dabei mit der Energie des Systems verglichen werden. Das Minimum ist der gesuchte Zustand. Die Lösungen der globalen Algorithmen können durch zusätzliche Terme in der Kostenfunktion regularisiert werden, was es zum Beispiel ermöglicht, glatte Oberflächen in der resultierenden Lösung zu bevorzugen.

Bei den lokalen Algorithmen werden zur Bestimmung der Disparität eines einzelnen Pixels in der Regel eine Vielzahl von Pixel aus der Umgebung innerhalb eines Fensters mit herangezogen. Der alleinige Signal- und Farbwert eines einzelnen Pixels reicht nicht aus, um diesen eindeutig einem Pixel aus dem zweiten Teilbild zuzuordnen. Daher wird im einfachsten Falle eine quadratische Umgebung um das behandelte Pixel betrachtet. Der sehr viel höhere Informationsgehalt in diesem Suchfenster ermöglicht eine eindeutige Zuordnung der Teilausschnitte. Jedoch wird bei der Bestimmung der Disparität effektiv über die Ausdehnung des Korrelationsfensters gemittelt. Das Korrelationsfenster selber wirkt daher annähernd wie ein Tiefpassfilter auf die berechnete Disparitätskarte. Wird das Korrelationsfenster vergrößert, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit eine eindeutige Bildverschiebung für den betrachteten Bildausschnitt zu finden, jedoch erhöht sich gleichermaßen die Tiefpasswirkung.

Weitergehende Algorithmen versuchen diesen Kompromiss durch die Bestimmung einer vom Bildinhalt abhängigen Suchfensterfunktion zu umgehen [Hosni u. a., 2011; Gupta und Cho, 2010]. Hierbei wird im Wesentlichen für jedes einzelne Pixel eine Fensterfunktion bestimmt, welche kantenerhaltend wirken soll. Somit ist die Wahl der idealen Suchfenstergröße l_F , bzw. dessen Form, ein wesentliches Thema bei der Implementierung der lokalen Algorithmen. Die lokalen Algorithmen sind im Vergleich zu den globalen Ansätzen grundlegend sehr viel effizienter in der Berechnung und somit bei laufezeitensensitiven Applikationen die bessere Wahl.

In dieser Arbeit wird ausschließlich mit der normierten, mittelwertsfreien Kreuzkorrelation gearbeitet. Die Kreuzkorrelation fällt unter die lokalen Algorithmen und zeichnet sich durch dessen geringe Komplexität und der damit einhergehenden hohen Rechengeschwindigkeit aus. Die Korrelation C zweier Funktionen F und F' ist in einer Dimension gegeben durch:

$$C(x) = \int F(x') \cdot F'(x - x') dx' = F(x) * F'(x) \quad (42)$$

In Worten bedeutet das, dass die Funktion $F'(x')$ relativ zur Funktion $F(x')$ um den Wert x verschoben und multipliziert wird. Zu jeder Verschiebung x wird das Integral des Produktes bestimmt. Die resultierende Funktion aus der Faltung $C(x)$ ist null, wenn an jeder Stelle x eine der beiden Funktionen F oder F' null ist und ergibt den maximalen Wert C_{max} bei der Verschiebung x_{max} , bei welcher die Ähnlichkeit der beiden Funktionen das Maximum erreicht. Also wird zur Bestimmung der Disparität das Maximum gesucht $C(x) \stackrel{!}{=} max$. Somit eignet sich die Korrelation als einfache Rechenmethode, um die relative Verschiebung zweier identischer oder ähnlicher Funktionen zu bestimmen.

In dem vorliegenden Fall, der Suche nach den identischen Bildinhalten, wird ein zweidimensionales Suchfenster definiert, um eine Lokalisierung der Suchfunktion zu gewährleisten. Aufgrund der diskreten Darstellung der Bilddaten wird aus dem Integral eine Summe. Die Verschiebung, bzw. die Faltung erfolgt entlang der Ebene, welche durch die Zentralstrahlen beider Teilkameras aufgespannt wird. Die Epipolargeometrie wird durch die Rektifizierung der beiden Teilbilder hergestellt. Diese stellt sicher, dass in den Bildkoordinaten entlang einer Dimension die Korrelation berechnet werden kann. Das Herstellen

der Epipolargeometrie durch die Rektifizierung ermöglicht eine wesentliche Optimierung der Recheneffizienz der Korrelation. Es erfolgt nach der Rektifizierung die Korrelation in zwei Dimensionen, wobei allerdings die diskutierte Verschiebung nur entlang einer Dimension stattfindet [Faugeras u. a., 1993]:

$$C(x, y, \Delta x) = \frac{\sum_{i,j} (B_1(x+i, y+j) - \overline{B_1(x, y)}) \cdot (B_2(x-\Delta x+i, y+j) - \overline{B_2(x-\Delta x, y)})}{\sqrt{\sum_{i,j} (B_1(x+i, y+j) - \overline{B_1(x, y)})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i,j} (B_2(x-\Delta x+i, y+j) - \overline{B_2(x-\Delta x, y)})^2}} \quad (43)$$

Die Summen laufen über $i = x - (l_{Fx} - 1)/2 \dots x + (l_{Fx} - 1)/2$ und $j = y - (l_{Fy} - 1)/2 \dots y + (l_{Fy} - 1)/2$, was der Kantenlänge des Suchfensters entspricht. In Worten beschrieben wird ein Bildbereich mit der Kantenlänge $l_{Fx} \times l_{Fy}$ um die Stelle x aus dem Bild der ersten Kamera in das zweite Bild auf die Positionen $x - \Delta x$ geschoben, mit dem überlappenden Bildbereich multipliziert und anschließend über beide Bilddimensionen in x und y Richtung absummiert. Die resultierende Funktion $C(x, y, \Delta x)$ spiegelt die Ähnlichkeit der beiden Teilbilder zu den Positionen Δx im Referenzbild zur Position x im zweiten Bild wider.

Zur Reduktion des Einflusses der intrinsisch verschiedenen Betrachtungswinkel beider Teilkameras und der damit einhergehenden Unterschiede im Bildsignal, werden die Fenster um den jeweiligen Mittelwert korrigiert. Um weiterhin den Einfluss des Helligkeitsverlaufes des Bildes auf das Ergebnis zu verhindern, wird der resultierende Korrelationsfaktor normalisiert. Mit diesem Verfahren kann aufgrund der diskreten Darstellung der Bilddaten nur auf ein Pixel genau die Verschiebung bestimmt werden. Allerdings kann die Genauigkeit durch Interpolation der Daten maßgeblich erhöht werden [Haller und Nedeveschi, 2012; Fore, 2010]. Hierzu wird nicht nur das Maximum $D_{max}(\Delta x_{max}, x)$ herangezogen, sondern symmetrisch verteilt mehrere Datenpunkte, deren Verlauf zum Beispiel durch eine Gaußverteilung angenähert werden kann. Aus dieser Näherung kann die Disparität mit einer Genauigkeit von ca. einem Zehntel Pixel abgeleitet werden. Die bestimmte Verschiebung der korrespondierenden Teilbilder entspricht der Disparität D an der Position x .

Die Korrelation hat den schwerwiegenden Vorteil, dass sie keinerlei zusätzlicher Bildmarker oder Musterprojektionsverfahren durch die Beleuchtung bedarf und prinzipiell sehr effizient und somit zeitsparend berechnet werden kann. Bei dem hier behandelten Messsystem der *Chromasens GmbH* werden die Korrelationsalgorithmen effizient auf Grafikprozessoren (GPU) implementiert. Diese sind sehr effizient hinsichtlich Rechenoperationen, die sich parallelisieren lassen. Es lassen sich mit einer GPU bis zu $7.3 \cdot 10^9$ Px/s verarbeiten, wobei die absolute Rechenzeit stark durch die Ausdehnung des Suchbereichs der Korrelation beeinflusst wird. Allerdings verlangt das Verfahren eine hinreichende Textur auf dem Objekt, um robuste Ergebnisse liefern zu können. Die Korrelation und die nachgeschaltete Interpolation liefern sehr präzise Ergebnisse, wenn hinreichend kontraststarke und hochfrequente Modulationen im Bildsignal vorhanden sind, um eine eindeutige Bestimmung der Disparität zu ermöglichen. Die Ausdehnung des verwendeten Fensters führt zu einer schwer voraussagbaren Tiefpasswirkung auf die ermittelten Höhendaten, da der Algorithmus in erster Näherung eine mittlere Verschiebung über das Suchfenster bestimmt. Hier sind aufwendigere Algorithmen vorteilhaft, da diese durch tiefer gehende Verarbeitung auch Kanten in den 3D-Daten erhalten können. Somit muss bei der Konfiguration der Ausdehnung der quadratischen Suchfenster stets ein Kompromiss zwischen erreichbarer Genauigkeit auf ebenen Flächen und der Tiefpasswirkung und Kantenverbreiterung in den Höhendaten getroffen werden. Die Auswirkung der Korrelationsfenstergröße auf das Messrauschen wird messtechnisch in Kapitel 6 ausführlich betrachtet.

2.3.6 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden die Grundlagen der zeilenkamerabasierten stereoskopischen Messung von 3D-Oberflächentopografien betrachtet. Wesentliche Parameter eines Stereo-Kamerasystems sind die optische Auflösung und der Basisabstand, da diese die erreichbare Höhenauflösung des Systems bestimmen.

Grundlegende geometrische Abbildungsfehler, welche in der Kamerakalibrierung bzw. der Rektifizierung kompensiert werden müssen, wurden besprochen. Durch die Rektifizierung werden die Bildinhalte auf die Epipolargeometrie transformiert. Hierdurch können Suchalgorithmen zur Rekonstruktion der 3D-Oberflächentopografien effizienter eingesetzt werden, da nur entlang einer Bilddimension die Korrespondenzen gesucht werden müssen.



3 Zielsetzung der Arbeit

Der Einsatz kamerabasierter Messgeräte zur Prozesskontrolle im industriellen Umfeld verlangt nach einem eingehenden Verständnis der mit diesen Systemen erreichbaren Messgenauigkeiten. Nur wenn die erreichbare Messgenauigkeit des jeweiligen Messsystems, bzw. Messgerätes bekannt ist, kann eine Aussage getroffen werden, ob das jeweilige Messgerät den Anforderungen und Toleranzen des betrachteten Produktionsprozesses, bzw. der messtechnischen Applikation gerecht wird. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit Methoden entwickelt und angewendet, um die messtechnischen Fähigkeiten und Limitierungen der kamerabasierten Messung aufzuzeigen. In diesem Zusammenhang werden die zeilenkamerabasierte Farb- und die 3D-Messung messtechnisch behandelt.

Der Anspruch an das zeilenkamerabasierte Farbmesssystem ist, dass es mit herkömmlichen spektrometerbasierten Farbmessgeräten absolut vergleichbare Farbwerte misst. Als Referenz dient hierbei der CIE-L*a*b* Farbraum, wobei Farbdifferenzen als euklidischer Abstand in ΔE_{76} gemessen werden. Die farbmetrische Abweichung zwischen der kamerabasierten Farbmessung und den etablierten Farbmessgeräten muss geringer als $1 \Delta E_{76}$ sein, um den Standards der Nutzer aus dem industriellen Umfeld gerecht zu werden. Abweichungen in dieser Größenordnung werden auch bei dem Vergleich von konventionellen Farbmessgeräten unterschiedlicher Hersteller beobachtet [Wyble und Rich, 2007b; Dolezalek und Kraushaar, 2005]. Ein konventionelles Farbmessgerät hat im direkten Vergleich mit einem Kamerasystem einige wesentliche messtechnische Vorteile:

Erstens beträgt die Messzeit für ein Reflexionsspektrum in der Regel ca. eine Sekunde, in dieser Zeit kann das Messgerät integrieren und somit das Rauschen der Messung stark reduzieren. Des Weiteren basieren herkömmliche Punktmessgeräte auf einem Spektrometer, welche relativ zu den bei typischen Reflexionsspektren auftretenden Bandbreiten eine hohe spektrale Auflösung besitzen. Meist beträgt die spektrale Bandbreite ca. 10 nm. Der sichtbare Wellenlängenbereich (380 – 730 nm) wird somit in der Regel mit 36 Stützstellen abgetastet [ISO13655, 2009].

Hingegen verfügt die in dieser Arbeit behandelte multispektrale Zeilenkamera über zwölf spektrale Kanäle, welche aufgrund des optischen Designs auch nicht vollständig linear unabhängig voneinander sein können. Somit muss im weitesten Sinne eine mathematische Abbildung gefunden werden, welche aus diesen zwölf Kanälen der multispektralen Kamera die Reflexionsspektren rekonstruiert [Urban, 2005; Eckhard, 2015]. Spektrometerbasierte Messgeräte geben das Reflexionsspektrum der Probe in dem Wellenlängenbereich von $\lambda = 380 \dots 730$ nm, mit einem Intervall von 10 nm aus, was 36 einzelnen Abtastpunkten des kontinuierlichen Reflexionsspektrums entspricht. Somit muss die signalverarbeitende Algorithmik des multispektralen Kamerasystems eine Abbildung von zwölf auf 36 Signalwerte ermöglichen. Im Allgemeinen stellt Letzteres ein nicht triviales, beziehungsweise unterbestimmtes oder schlecht konditioniertes mathematisches Problem dar [Eckhard, 2015, Kapitel 5], ribes2008linear, [Heikkinen u. a., 2007].

Im Falle der multispektralen Zeilenkamera kann das Messfeld basierend auf Bildverarbeitung frei gewählt und in derselben Messzeit eine viel größere Anzahl von Messfeldern ausgewertet werden. Trotz dieser massiven Vorteile hinsichtlich der Möglichkeiten der intelligenten, bildbasierten Auswertungsmethoden, müssen die Messergebnisse der multispektralen Zeilenkamera absolut vergleichbar mit den Ergebnissen konventioneller Messgeräte sein.

Ob die weitaus geringere Anzahl der Kanäle der multispektralen Zeilenkamera hinreichend für farbmessstechnische Applikationen ist, muss daher eingehend untersucht werden. Hierzu wird das System messtechnisch und durch Simulationen charakterisiert. Das Ziel ist es hierbei dessen Verhalten durch ein physikalisches Modell beschreiben zu können. Dieses Modell wird dazu verwendet Sensitivitätsanalysen durchzuführen. Die Sensitivitätsanalyse dient dazu die kritischen Parameter des multispektralen Zeilen-

kamerasystems bestimmen und ggf. optimieren zu können. Daher wird im Folgenden im Detail durch Messdaten und durch Simulationen die multispektrale Zeilenkamera hinsichtlich der zu erwartenden Messfehler qualifiziert. Die Simulation, die hier entwickelt wird, basiert auf eingehenden Messdaten, welche durch die messtechnische Qualifizierung der einzelnen Komponenten erlangt werden. Hierbei sind zu nennen das signalabhängige Rauschen des Zeilensensors und die spektralen Empfindlichkeiten der zwölf Kanäle der Kamera. Die wesentlichen wissenschaftlichen Fragestellungen hinsichtlich der zeilenkamerabasierten Farbmessung lauten:

- Mit welchem Verfahren können die spektralen Empfindlichkeiten der Kamerakanäle vermessen werden?
- Wie genau kann die Farbe absolut im Vergleich mit einem konventionellen Farbmessgerät gemessen werden?
- Wie universell anwendbar ist die Kalibrierung zur spektralen Rekonstruktion?
- Welche ist die applikationsspezifische, optimale Messfeldgröße?
- Wie beeinflussen bekannte Limitierungen, wie die Nichtlinearität, Instabilitäten des Dunkelsignals und des Weißpunktes und die endliche, digitale Signalauflösung das Messergebnis?

Diese Fragestellungen werden durch messtechnische Untersuchungen und Simulationen in Kapitel 5 behandelt. Die eben genannten Punkte beziehen sich auf die genaue Analyse und Voraussage des Kamerasignals in Abhängigkeit von der Reflexion einer gegebenen Probenoberfläche. Ist das Verhalten des multispektralen Kamerasystems durch Messungen und Simulationen hinreichend verstanden, kann eine fundierte Aussage hinsichtlich der Anwendbarkeit der Messtechnik im industriellen Umfeld getroffen werden. Vorangehende Untersuchungen desselben Systems sind von Godau u. a. [2013], Eckhard u. a. [2014], Auer [2015], Prayagi [2011] und Lu [2013] durchgeführt worden. In der vorliegenden Arbeit werden Messungen und Simulationen zusammengeführt, um ein tiefgehendes Verständnis der messtechnischen Abhängigkeiten entwickeln zu können.

Im anschließenden Kapitel 6 werden Methoden zur Charakterisierung der Stereo-Zeilenkamera entwickelt. Die stereoskopische Vermessung von Oberflächentopografien ist stark abhängig von der Abbildungsleistung des optischen Systems. Hierbei sind zu nennen die optische Modulationsübertragungsfunktion (MTF), sowie insbesondere die zusätzliche Unschärfe durch eine intrinsisch auftretende Defokussierung. Diese tritt insbesondere im Falle hochauflösender Systeme auf ($m \approx 1$), da hier die Schärfentiefe gering ist. Ein robuster und hinsichtlich der Rechenzeit effizienter Suchalgorithmus zur Rekonstruktion der Oberflächentopografie basiert auf der normierten Kreuzkorrelation beider Teilbilder. Dieser lokale Algorithmus verlangt eine Definition einer Suchfenstergröße, welche wiederum erheblichen Einfluss auf die erhaltenen Messergebnisse hat. Die optimale Suchfenstergröße steht im engen Zusammenhang mit den auftretenden Strukturgrößen auf dem Objekt, da für eine eindeutige und präzise Bestimmung der Disparität (D) eindeutig zuweisbare Bildinhalte in dem Suchfenster vorhanden sein müssen. In der Regel kann mit einem größeren Fenster die Eindeutigkeit und die Genauigkeit der Bestimmung der Bildkorrespondenzen verbessert werden. Hingegen verursacht ein größeres Suchfenster eine Art Tiefpasswirkung auf die gemessene Disparitäten. Steile Kanten im Höhenprofil können somit schlechter aufgelöst werden, was oft eine nicht zu vernachlässigende messtechnische Limitierung darstellt. Das Rauschen der in die Höhenberechnung eingehenden Bilddaten überträgt sich in die rekonstruierten Höhendaten. Hier bestehen komplexe Abhängigkeiten zwischen der Defokussierung der erfassten Bilddaten und der eingesetzten Suchfenstergröße. Insbesondere diese Sachverhalte werden in Kapitel 6 im Detail betrachtet.

Die hier beschriebenen Abhängigkeiten können nicht auf einfache Weise analytisch beschrieben werden und werden nicht durch den etablierten Standard VDI/VDE 2634 [VDI/VDE, 2002, 2012, 2008] abgedeckt. Daher werden Methoden zur messtechnischen Qualifizierung des Stereo-Zeilenkamerasystems entwickelt. Ziel ist es, das Messrauschen in Abhängigkeit der vielfältigen Parameter zu analysieren und

somit verstehen zu können. Die wesentlichen Einflussgrößen auf das Messrauschen sind das Rauschen der Bilddaten, die MTF der abbildenden Optik und die Korrelationsfenstergröße. Somit lauten die wesentlichen wissenschaftlichen Fragestellungen hinsichtlich der komplexen Abhängigkeiten der 3D-Messung mit der Stereo-Zeilenkamera:

- Mit welcher Methode kann die Änderung der MTF im dreidimensionalen Raum erfasst werden?
- Wie wirkt sich die Verringerung der MTF durch die Defokussierung auf das Messrauschen aus?
- Wie wirkt sich die Größe des Korrelationsfensters im Zusammenhang mit der Defokussierung und dem Rauschen des Bildsignals auf das Rauschen der 3D-Messung aus?
- Wie kann der Messbereich und somit der Dynamikbereich eines hochauflösenden Stereo-Zeilenkamerasystems bestimmt werden?

Diese Fragen werden in Kapitel 6 durch messtechnische Untersuchungen und weitergehende Überlegungen hinsichtlich einer allgemeineren Beschreibung der Schärfentiefe diskutiert. Die hier angesprochenen Abhängigkeiten werden in verfügbaren Standards nicht behandelt und gehen somit über die bekannten Untersuchungen und Methoden hinaus [Luhmann und Wendt, 2000; Rautenberg und Wiggenhagen, 2002; OptAssyst, 2016]. In der Arbeit von Rajagopalan u. a. [2004] wird ebenfalls die Defokussierung im Falle einer Stereokamera betrachtet, wobei hier die Defokussierung verwendet wird, um die Höhen, bzw. die Abstandsmessung zu verbessern. Eine detaillierte Untersuchung, wie sich die Defokussierung in einem Stereosystem auf das Messrauschen auswirkt, ergänzt somit die bestehende Literatur.



4 Charakterisierung des Kamerasensors

Die Bewertung einer Kamera nach dem EMVA 1288 Standard [EMVA, 2010] (siehe Kapitel 2.1) wird in diesem Kapitel nicht vollständig betrachtet. Es werden die Anwendung des linearen Kameramodells und die Spezifikation der Messbedingungen des Standards eingesetzt, um ein auf Messdaten basierendes Modell der Kamera abzuleiten. Dieses ermöglicht es, abhängig vom Betriebspunkt der Kamera das zu erwartende Signal und insbesondere dessen Rauschen zu bestimmen. Hierbei werden das Schrotrauschen, das Dunkelrauschen und die Nichtlinearität der Kamera in Betracht gezogen. Die auftretenden räumlichen Inhomogenitäten des Sensors (Variation der Quanteneffizienz über die Pixel hinweg) werden nicht betrachtet. Letzteres ist darin begründet, dass die in dieser Arbeit eingesetzten Sensoren sehr geringe Varianzen des Dunkelsignals (DSNU : *'Darks Signal Non-Uniformity'*) und des Signals unter Belichtung (PRNU : *'Photo Response Non-Uniformity'*) aufzeigen. Diese können vollständig durch eine Dunkelsignalsubtraktion, beziehungsweise durch eine pixelweise Multiplikation (Shadingkorrektur) kompensiert werden. Das Systemrauschen und die zu erwartende Nichtlinearität sind daher als die dominierenden Einflussgrößen bei der Analyse der kamerabasierten Messsysteme anzusehen und werden daher hier im Detail untersucht. Die vollständige Analyse, und im Speziellen die Anpassung der Auswertungen nach dem EMVA 1288 Standard auf Zeilensensoren, sowie weitreichende Ausarbeitungen zum experimentellen Aufbau, sind in der Masterarbeit von Hollingsworth [2012] zu finden.

Im späteren Verlauf der Arbeit wird die an den EMVA 1288 Standard angelehnte Vermessung der spektralen Empfindlichkeiten der Kanäle der multispektralen Zeilenkamera im Detail diskutiert (siehe Kapitel 5). Über die Empfehlungen des EMVA 1288 Standards hinaus, wurden die Auswertungen in Abhängigkeit der Systemverstärkung, bzw. des Betriebspunktes vorgenommen.

Im Folgenden wird gezeigt, dass nicht im Allgemeinen sondern nur hinsichtlich einer speziellen Anwendung der optimale Betriebspunkt der Kamera definiert werden kann. Der Grund liegt in der gegenläufigen Abhängigkeit der Linearität und des Signalrauschens von der Systemverstärkung. Somit muss in Zusammenhang mit der Applikation und dem verwendeten Sensor eine optimale Systemverstärkung bestimmt werden.

4.1 Experimenteller Aufbau

In Abbildung 21 ist der entwickelte Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Auf der linken Seite ist eine alternierende Anordnung von roten, grünen und blauen Hochleistungs-LEDs [Osram, 2017] angebracht (LED: *'Light Emitting Diode'*). Geeignete Lichtquellen sind insbesondere LEDs, da diese mit einer hinreichend geringen Bandbreite verfügbar sind, um die drei Kanäle einer Farbkamera selektiv bewerten zu können, wie es durch den EMVA 1288 Standard vorgeschrieben wird. Die hohe Strahlungsleistungen von ca. 1 W/LED und die hohe Effizienz von bis zu 50-70 % [Pimputkar u. a., 2009] sind weitere wesentliche Argumente für den Einsatz von LEDs. Jedoch ist die optische Effizienz von der Temperatur und somit auch von der Stromstärke abhängig, was eine aktive Stabilisierung der optischen Leistung für die Messung erfordert, wenn die Stromstärke variiert wird. Außerdem können LEDs meist nur über etwa einen Faktor 10 in der optischen Strahlungsleistungen eingestellt werden, was für eine vollständige hoch auflösende Vermessung des Dynamikbereichs einer Kamera nicht hinreichend ist. Daher wird hier die LED-basierte Beleuchtung bei konstanter Stromstärke betrieben und die Integrationszeit der Kamera kontrolliert geschaltet. Zeitkonstanten lassen sich aufgrund von in der Kamera zur Synchronisation integrierten Quarzoszillatoren sehr präzise einstellen und bilden daher hier die Basis für eine sehr hohe Messgenauigkeit der Linearität und des signalabhängigen Rauschens des Kamerasensors.

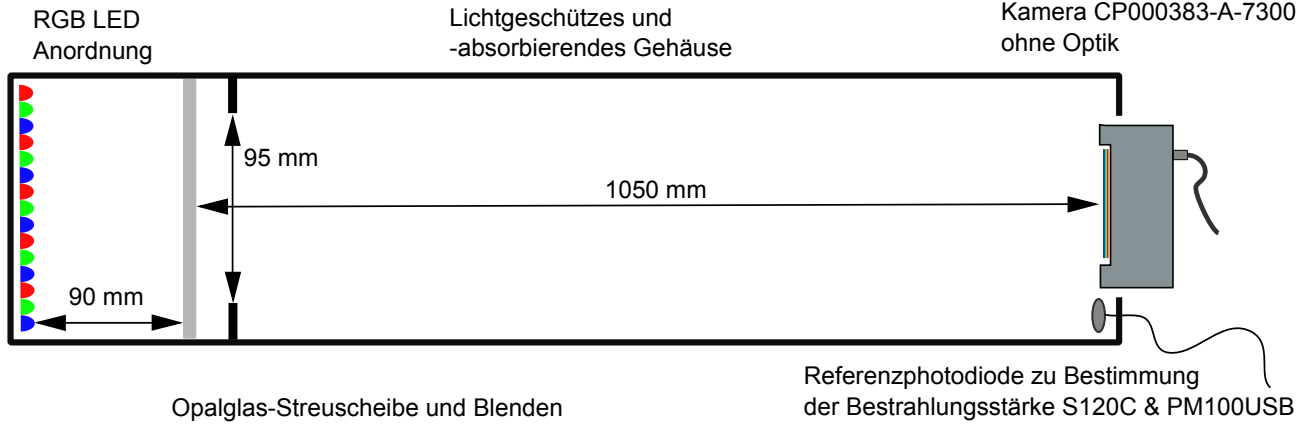


Abbildung 21: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Charakterisierung des Kamerasensors angelehnt an den EMVA 1288 Standard. Auf der linken Seite sind die LEDs (Typ: Osram Oslon: red, true green, deep blue [Osram, 2017]) gezeigt. Zur Homogenisierung der Bestrahlungsstärke wird eine Opalglas-Streuscheibe eingebracht. Zur Referenzmessung wird eine kalibrierte Referenzphotodiode der Firma Thorlabs eingesetzt [Thorlabs, 2017b,a].

Pro Farbkanal werden 44 LEDs mit einer elektrischen Leistung von $P_{el} \approx 2\text{ W}$ eingesetzt, was insgesamt zu einer Leistungsaufnahme von ca. 260 W führt. Der Abstand zwischen den LEDs und der diffusen Scheibe, sowie der Abstand der diffusen Scheibe zum Kamerasensor und der Durchmesser der diffusen Scheibe als Strahlungsquelle wurden entsprechend den Bedingungen des EMVA 1288 Standards gewählt. Weiterhin wurde die Geometrie dahingehend experimentell optimiert, sodass die Bedingung der Homogenität der Bestrahlungsstärke am Sensor erfüllt wird. Hierbei werden zwei Bedingungen an die Geometrie gestellt. Zum einen muss die Bestrahlungsstärke über den gesamten Sensor sehr konstant sein $(E_o^{max} - E_o^{min})/\bar{E}_o < 0.005$. Dies führt zu der Bedingung, dass die homogene Lichtquelle weiter ausgedehnt sein muss, als die geometrische Diagonale des Sensors. Es wird eine maximale Sensordiagonale von 73 mm angenommen und daher die Fläche der Lichtquelle mit einer Blende auf 95 mm begrenzt. Zur Einschränkung der Winkel des auf den Sensor eintreffenden Lichtes, wird weiterhin im EMVA 1288 Standard die Bedingung definiert, dass der Abstand zwischen Kamerasensor und Lichtquelle mehr als einen Faktor 8 der Diagonalen der Lichtquelle betragen muss. Daher wurde der Abstand zwischen Kamerasensor und Lichtquelle auf 1050 mm gesetzt.

Da bei der Messung die Integrationszeit der Kamera sukzessive erhöht wird, ergibt sich eine gesamte Messzeit von

$$t_{mess} = \sum_{i=1}^{64} N_Z * t_{inti} = 18.5\text{ s}, \quad (44)$$

wobei die einzelnen Integrationszeiten ein Vielfaches der Startintegrationszeit sind $t_{inti} = t_{int1} * i = 70\mu\text{s} * i$ und N_Z die Anzahl der pro eingestellter Integrationszeit aufgenommenen Zeilen ist. Somit ist ein kontrollierter linearer Anstieg des Signals gewährleistet. Bei konstanter Bestrahlungsstärke, also einer konstanten Rate der pro Zeiteinheit und Fläche eintreffenden Anzahl Photonen $N_p/(\Delta t \Delta A)$, ist die gesamte Zahl der zur Messung beitragenden Photonen linear zur Integrationszeit. Um die Bestrahlungsstärke während der Messung möglichst konstant zu halten, werden die LEDs vor jeder Messung aufgewärmt. Zusätzlich kann durch die Referenzphotodiode kontrolliert werden, dass die Bestrahlungsstärke während der Messzeit hinreichend stabil ist. Der absolute Wert der Strahlungsleistung auf einer bekannten photoaktiven Fläche wird ebenfalls mit dieser Photodiode bestimmt, welcher für die Ableitung der Quanteneffizienz η und der Systemverstärkung K bekannt sein muss. Untersuchungen haben ergeben, dass die relative Schwankung der Bestrahlungsstärke über die Messzeit im thermisch einge-

schwungenen Zustand des Messaufbaus in der Größenordnung von 10^{-3} liegt, was somit auch eine direkte Limitierung für die Genauigkeit der Messung der absoluten Linearität der Kamera darstellt.

Entsprechend den Ansprüchen des EMVA 1288 Standards wurden als Lichtquelle schmalbandige LEDs gewählt, deren Emissionsmaximum auf das jeweilige Maximum der Quanteneffizienz des zu vermessenden Farbkanals fällt (siehe Abbildung 22). Die Bildaufnahme für die drei Farbkanäle erfolgt zeitlich nacheinander, um die spektrale Kopplung der Farbkanäle untereinander vernachlässigen zu können. Außerdem ist es notwendig für die Bestimmung der absoluten Bestrahlungsstärke die Wellenlänge des einfallenden Lichtes zu kennen, da diese für die absolute Kalibrierung der Referenzphotodiode bekannt sein muss. Somit kann direkt aus dem gemessenen Kamerasignal und der mit der Referenzdiode gemessenen Bestrahlungsstärke die Quanteneffizienz der einzelnen Kamerakanäle bestimmt werden. Zur Ermittlung des Dunkelsignals und des Dunkelrauschens wird bei derselben Konfiguration ein Bild bei ausgeschalteter Beleuchtung aufgenommen.

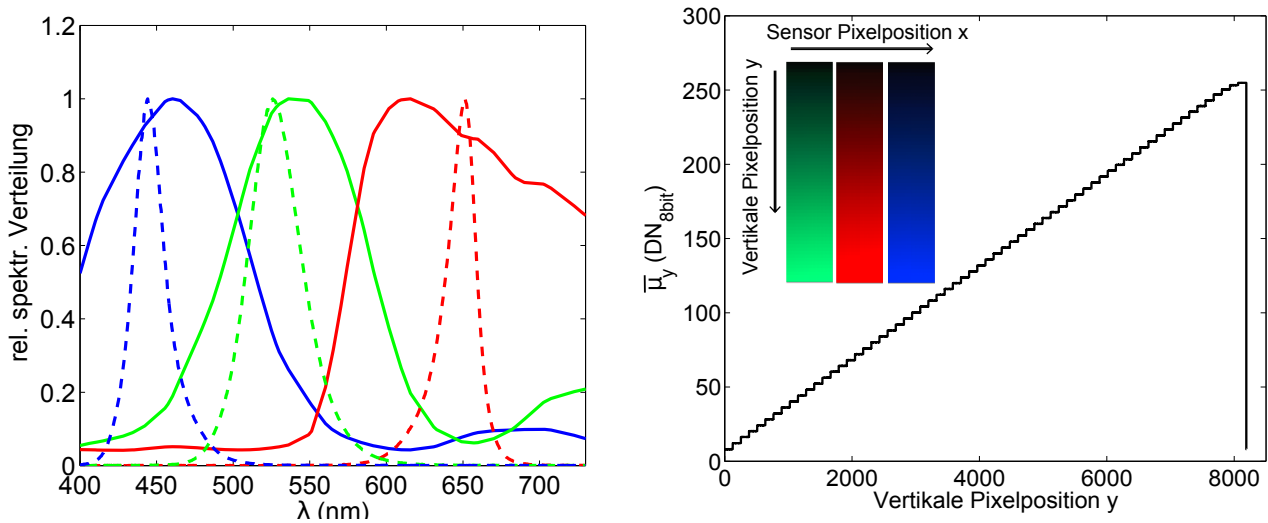


Abbildung 22: Links sind überlagert die spektrale Empfindlichkeit des RGB-Sensors $\Psi_{RGB}(\lambda)$ und die spektralen Leistungsdichten der verwendeten LEDs $S_{LED,R}(\lambda)$, $S_{LED,G}(\lambda)$, $S_{LED,B}(\lambda)$ über die Wellenlänge λ aufgetragen. Klein auf der rechten Seite sind die Bilder zu sehen, in welchen die Integrationszeit um einen Faktor 64 durchgeschaltet wurde. Alle 128 Zeilen wird die Integrationszeit um t_{int1} erhöht und somit das Kamerasignal kontrolliert über den gesamten Dynamikbereich der Kamera variiert. Der Rot-, Grün- und Blaukanal werden dabei zeitlich nacheinander aufgenommen. Auf der rechten Seite ist exemplarisch der Signalmittelwert $\bar{\mu}_y$ über jede einzelne Zeile im Falle des Grünkanals dargestellt. Hier sind die 64 Plateaus zwischen dem Umschalten der Integrationszeit klar ersichtlich.

Der EMVA 1288 Standard hält offen, ob zur kontrollierten Variation des Messsignals die optische Leistung oder die Integrationszeit des Sensors variiert wird. Voruntersuchungen haben ergeben, dass der Dynamikbereich typischer Hochleistungs-LEDs nicht geeignet ist, um eine solche Messung vornehmen zu können. Praktikabel ist beispielsweise eine Variation des Stroms, welcher an die LEDs angelegt wird, um einen Faktor 10. Bei geringen Strömen (an der Schaltschwelle) ist es allerdings schwierig den Strom zu stabilisieren, da hier die Strom - Spannungscharakteristik der LEDs eine ausgeprägte Nichtlinearität aufweist. Bei sehr hohen Strömen ist wiederum der thermische Leistungseintrag beachtlich, was wiederum durch die verursachten thermischen Schwankungen zu Instabilitäten der Strahlungsleistung und der durch die LEDs emittierten Zentralwellenlänge mit sich bringt. Die Integrationszeit hingegen kann sehr präzise kontrolliert werden, da die gesamte Synchronisation der Sensorelektronik auf hoch stabilisierte Quarz-Oszillatoren basiert. Deren sehr genau bekannte und vor allem zeitlich stabile Taktfrequenz ($\Delta \nu / \nu \approx 10^{-7}$) dient hier als Referenz zur präzisen Kontrolle der Integrationszeit.

Aus diesen Überlegungen heraus werden die LEDs an einem möglichst stabilen Betriebspunkt gehalten, wobei die Anpassung der Integrationszeit zur kontrollierten Variation des Kamerasignals eingesetzt wird. In Darstellung 22 wird gezeigt, wie die aufgenommenen Bilder und das daraus resultierende Signal aussehen. Rechts sind die einzelnen, seriell aufgenommenen RGB-Bilder zu sehen. Zu jeder Integrationszeit $t_{int\ i}$ werden 128 Zeilen aufgenommen, um hinreichend viele Messpunkte zur Bewertung der zeitlichen Varianz des Kamerasignals verfügbar zu haben. Der Mittelwert über jede einzelne Stufe wird hingegen berechnet, um die Linearität des Systems ableiten zu können. Die x-Achse zur Bestimmung der Linearität wird definiert durch die konstante Bestrahlungsstärke, die Pixelfläche und die jeweilige eingestellte Integrationszeit. Auf der rechten Seite in Abbildung 22 ist exemplarisch der Mittelwert über jede einzelne Zeile, über den Zeilendindex aufgetragen. Hier ist erkennbar, dass das mittlere Kamerasignal stufenweise kontrolliert über den gesamten Dynamikbereich der Kamera erhöht wird, bis das Signal in die Sättigung gelangt. Im Folgenden werden die relevanten Daten, welche aus diesen Messreihen extrahiert werden können, diskutiert.

4.2 Linearität

Zur Bestimmung der Linearität wird jede der Signalstufen, welche bei konstanter Integrationszeit aufgenommen werden, über die zeitlich nacheinander aufgenommenen Zeilen und über die Sensorzeile hinweg gemittelt und über die während der Messzeit auf einem einzelnen Pixel auftreffenden Photonenanzahl aufgetragen. In dem hier präsentierten Datensatz wurde exemplarisch der Rotkanal des Zeilensensors herangezogen, die anderen beiden Kanäle verhalten sich equivalent, da das gesamte elektronische Design der drei Sensorzeilen identisch ist. Der einzige Unterschied besteht in der Quanteneffizienz der Kanäle, da diese durch die aufgebrachten RGB-Farbabsorptionsfilter variieren. Die Zentralwellenlänge der eingesetzten LED liegt hier bei $\lambda = 632\text{ nm}$ [Osram, 2017], die in der Ebene des Kamerasensors mit der Referenzphotodiode gemessene optische Bestrahlungsstärke liegt bei $E_o = 4.21\mu\text{W}/\text{cm}^2$, woraus sich nach der Relation (siehe [EMVA, 2010] Gleichung 4)

$$N_p = 50.34 \cdot A_{px} \cdot t_{int} \cdot \lambda \cdot E \quad (45)$$

die absolute Anzahl der während der Integrationszeit einfallenden Photonen N_p ergibt. $A_{px} = 90\mu\text{m}^2$ ist die photoaktive Fläche eines einzelnen Pixels. Bei der Beziehung 45 werden nach dem EMVA 1288 Standard die Einheiten $[t_{int}] = \text{ms}$, $[\lambda] = \mu\text{m}$ und $[E] = \mu\text{W}/\text{cm}^2$ verwendet.

Abbildung 23 zeigt die gemessene Linearität der Kamera über den gesamten Dynamikbereich der 8 bit Daten bei einem gewählten mittleren Betriebspunkt, bei welchem etwa die Hälfte der vollen Kapazität der Pixel erreicht wird. Die Linearität des Sensors ist an diesem Betriebspunkt außerordentlich gut, die gemessene Nichtlinearität liegt bereits im Bereich der Messgenauigkeit des Verfahrens, welches durch die Stabilität der Beleuchtung limitiert wird. Die Messung ergibt eine relative Nichtlinearität nach EMVA [2010] von $LE = 0.064\% \hat{=} 6.410^{-4}$. Die Stabilität der Beleuchtung über die Messzeit wurde hingegen zu 10^{-3} bestimmt. Somit ist innerhalb der hier möglichen Messgenauigkeit an diesem Betriebspunkt die Kamera ideal linear.

Derselbe Datensatz wurde auch bei Vollaussteuerung des Sensors aufgenommen, wobei sich eine relative Nichtlinearität nach dem EMVA 1288 Standard von $LE = 0.6\%$ ergibt, also eine Erhöhung der Abweichungen um einen Faktor 10. Aus diesem Datensatz kann nun die Nichtlinearität des Sensors bei jedem Betriebspunkt abgeleitet werden, da entsprechend der Darstellung 26, ausgehend von der Messung bei Vollaussteuerung, der reduzierte Datensatz abgeleitet werden kann, indem der Datensatz im oberen Messbereich einfach beschnitten wird. Der letzte Schritt kann nur unter der Bedingung durchgeführt werden, dass immer noch hinreichend viele Messschritte in dem Datensatz enthalten sind. Hinsichtlich typischer Messaufgaben ist es allerdings nicht notwendig den Sensor mit einer Verstärkung zu betreiben, bei welcher weniger als die Hälfte der vollen Kapazität der Pixel ausgenutzt wird. Wie hier gezeigt, kann in diesem Bereich bereits die Nichtlinearität des Sensors vernachlässigt werden.

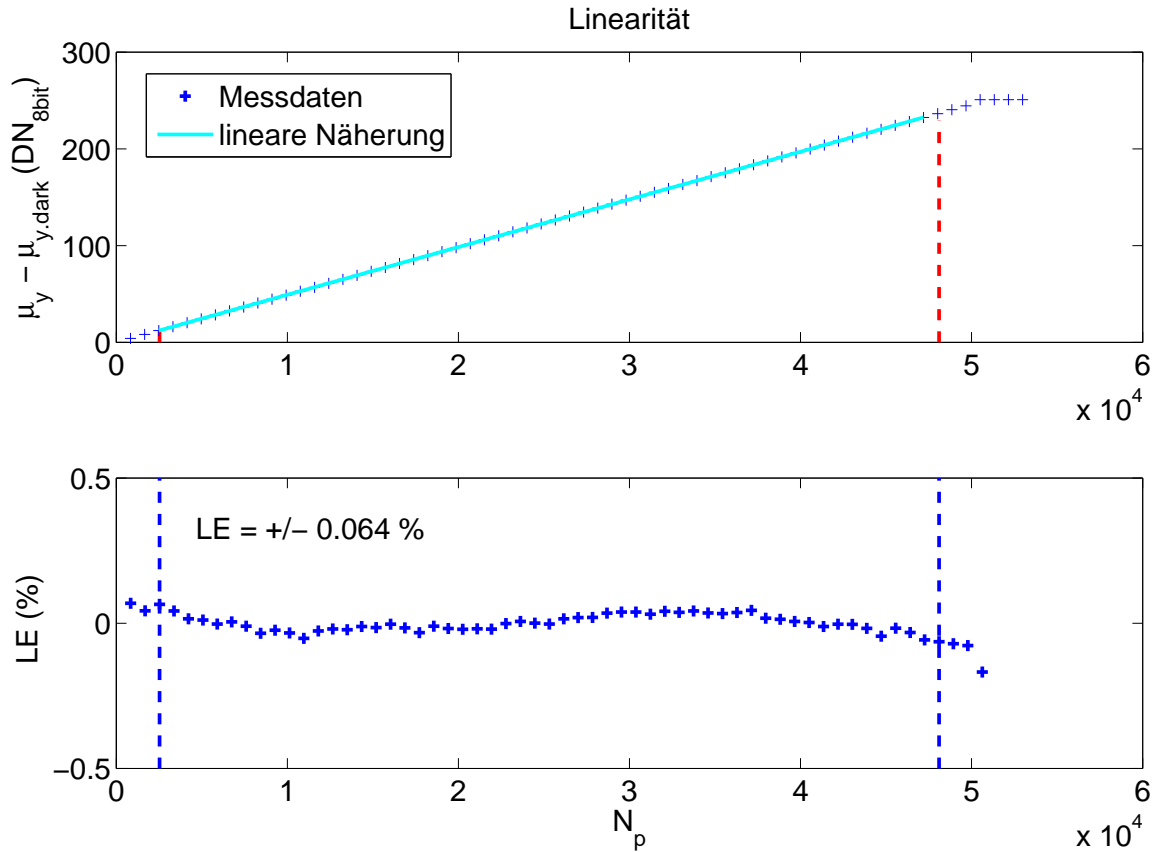


Abbildung 23: Aufgetragen ist im oberen Grafen das mittlere Kamerasignal μ_y , korrigiert um das gemessene Dunkelsignal $\mu_{y,dark}$ über die Anzahl der über die Integrationszeit t_{int} auf einem Pixel der Fläche A_{px} auftreffenden Anzahl Photonen N_p . Zur Bestimmung des Linearitätsfehlers LE wird der Signalverlauf durch ein Polynom erster Ordnung angenähert. Im unteren Diagramm wird die auf den bei 95% des Dynamikbereichs erreichten Signals normierte Differenz zwischen den Messdaten und der linearen Näherung über den Signalbereich von 5% bis 95% aufgetragen. Der gemessene Linearitätsfehler wird aus dem Mittel der maximalen positiven und negativen Abweichung bestimmt und liegt hier bei $LE = \pm 0.064\%$.

Eine weitere Erhöhung der Systemverstärkung führt zu einem weiteren Abfallen des maximalen SNR, was im Allgemeinen nicht wünschenswert ist. Die hier vermessene Nichtlinearität bei voller Sensoraussteuerung ist so gering, dass in farbmesstechnischen Applikationen keine negativen Effekte zu erwarten sind. Details werden in Kapitel 5 durch Simulationen dargelegt. Im Bereich der zeilenkamerabasierten stereoskopischen 3D-Messung kann eine nichtlineare Verzerrung sogar gezielt eingesetzt werden, um den effektiven Dynamikbereich des Systems zu erweitern. Hierzu wird in der Kamera bei einer digitalen Signalaufösung von mehr als 8 bit das Signal mit einer Gammakorrektur verzerrt, um im unteren (schwarzen) Signalbereich effektiv eine höhere digitale Auflösung zu erzielen. Das ist insbesondere auf sehr kontraststarken Oberflächen hilfreich, wenn im geringen Signalbereich noch geringfügige Kontraste aufgelöst werden müssen.

4.3 Rauschen

Das Kernelement der Analyse besteht in der Photontransfermethode, welche auf der Betrachtung des signalabhängigen Rauschens des Sensors basiert. Zur Charakterisierung des Rauschens wird auf jeder

Signalstufe der einzelnen Integrationszeiten die Varianz für jedes einzelne Pixel berechnet, welche wiederum über eine komplette Signalstufe hinweg über die einzelnen physikalischen Pixel gemittelt wird, um die mittlere Varianz über alle Sensorpixel hinweg zu erhalten. Analysen haben hier ergeben, dass aufgrund der geringen Variation der Quanteneffizienz der einzelnen Pixel zueinander, auch das Rauschen der Pixel untereinander nur sehr geringe Variationen aufweist.

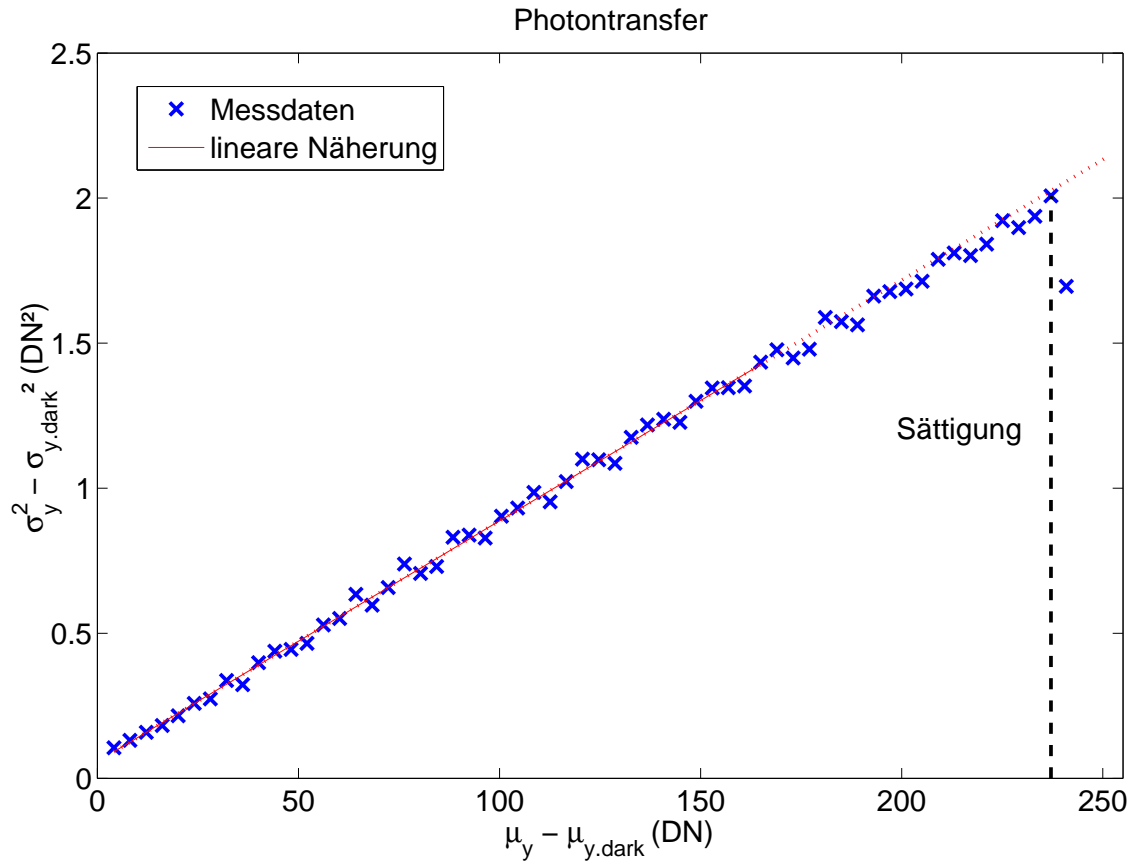


Abbildung 24: Dargestellt ist die Photonentransferfunktion der Kamera, wobei die zeitliche Varianz des Signals über das mittlere Signal aufgetragen wird. Die Steigung der Geraden erlaubt es die Systemverstärkung K der Kamera zu bestimmen. Aus dem absoluten Wert der Varianz wird die Anzahl der absorbierten Photonen und somit die Quanteneffizienz abgeleitet. Weiterhin beweist der lineare Verlauf, dass hier das Rauschen durch das Schrotrauschen der Photonenabsorption dominiert wird.

In Abbildung 24 ist die Photonentransferfunktion der analysierten Kamera gezeigt. Die Varianz, gemessen in DN, ist hier aufgetragen über das mittlere Signal, ebenfalls gemessen in DN (einheitenloser Digitalwert: 'Digital Number'). Nach Gleichung 11 ist ersichtlich, dass sich die Varianz des Systems aus einem konstanten Anteil und einem linear mit der Steigung K^2 ansteigenden Beitrag zusammensetzt. Dieser Sachverhalt wird eingesetzt, um die Systemverstärkung K zu bestimmen, indem die integrationszeitabhängige Varianz um die konstanten Beiträge korrigiert wird. Die Steigung K^2 wird durch eine lineare Näherungsfunktion extrahiert. Der lineare Anteil der Varianz ist ausschließlich bestimmt durch das Schrotrauschen. Der wiederum lineare Zusammenhang zwischen der Varianz und der Anzahl der akkumulierten Ladungsträger (siehe Gleichung (6)) erlaubt direkt die Bestimmung der Anzahl der absorbierten Photonen über die gemessene Varianz. Interessant ist hierbei, dass das Rauschen, beziehungsweise dessen bekanntes Verhalten, als messtechnischer Zugang zur Anzahl der absorbierten Photonen verwendet werden kann. Im Allgemeinen wird Rauschen mit einer negativen Systemeigenschaft in Verbindung gebracht, hingegen bei quantenmechanischen Systemen, welche durch ihre physikalische

Natur Fluktuationen bestimmter Messgrößen zeigen, ist das Rauschen selbst als relevante, aussagekräftige Messgröße zu begreifen. Es ergibt sich exemplarisch die Systemverstärkung $1/K = 120.5 \text{ DN}^{-1}$. Es werden somit pro digitaler Stufe durchschnittlich 120.5 Photonen absorbiert, bzw. freie Ladungsträger generiert. Weiterhin wird unter Einsatz von Gleichung 10 die Quanteneffizienz $\eta(\lambda = 632 \text{ nm}) = 0.57$ abgeleitet. Zusammenfassend beschrieben wird das bekannte Verhalten des signalabhängigen Rauschens verwendet, um zu einer in der Messung auftretenden Anzahl von einfallenden Photonen N_p (Gleichung 45) die Anzahl der erzeugten Ladungsträger N_e zu bestimmen. Aus diesen Größen lassen sich die Systemverstärkung und die Quanteneffizienz berechnen.

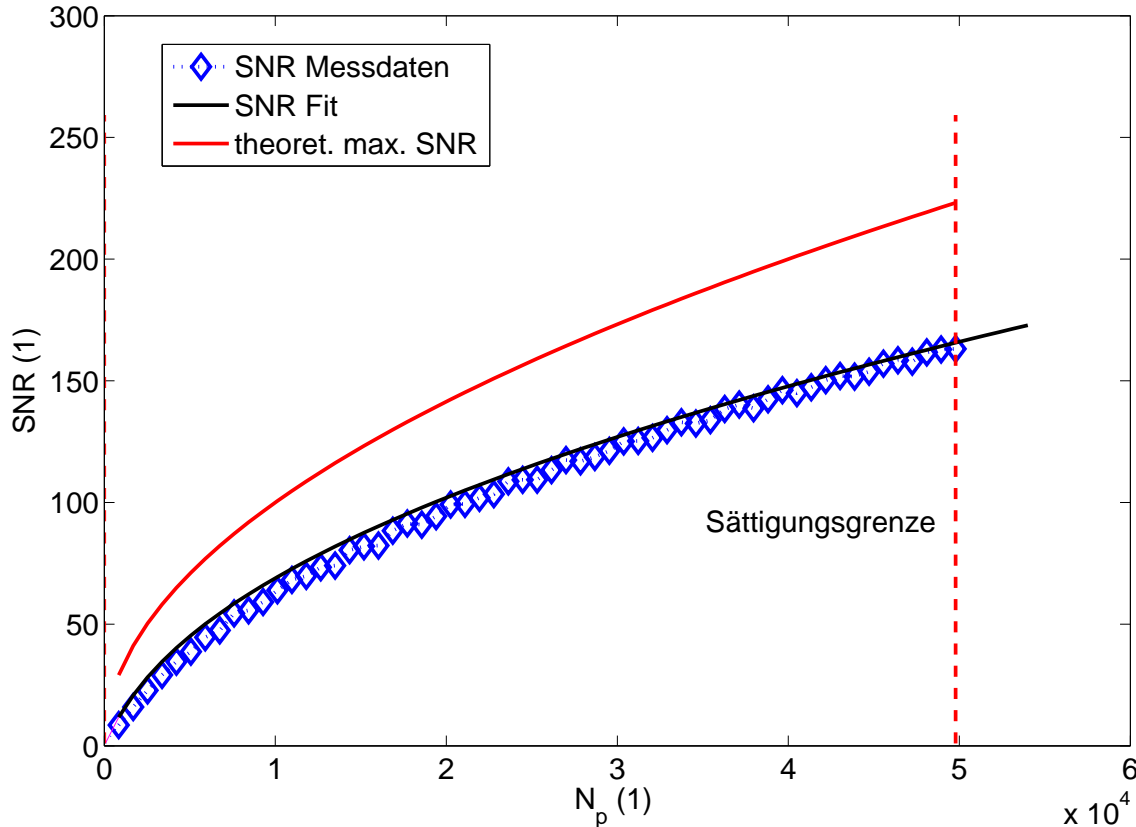


Abbildung 25: Aufgetragen ist das signalabhängige SNR, sowie die theoretische Obergrenze eines idealen Sensors, welcher sich durch eine ideale Quanteneffizienz $\eta = 1$ auszeichnet.

In Darstellung 25 wird das gemessene sowie das theoretisch maximal erreichbare SNR über das Signal aufgetragen. Die ideale Photodiode zeichnet sich durch eine maximale Quanteneffizienz $\eta = 1$ aus, hier entspricht die Varianz direkt der Anzahl der einfallenden Photonen. Aus dieser Betrachtung heraus ergibt sich, dass bei gegebener Bestrahlungsstärke das Rauschen des Sensors ausschließlich über eine Erhöhung der Quanteneffizienz optimiert werden kann. Bei einer sehr geringen Anzahl von einfallenden Photonen ist hingegen das Dunkelrauschen limitierend, welches durch thermisch erzeugte Ladungsträger und im Falle hoher Ausleseraten und kurzer Integrationszeiten durch elektronisches Ausleserauschen bestimmt wird. Daher wird meist bei Sensoren, welche in der Astronomie eingesetzt werden, großes Augenmerk auf die Optimierung der auslesenden Elektronik gelegt. Zudem werden die Sensoren aktiv gekühlt, um die thermischen Fluktuationen, bzw. den Dunkelstrom sowie das Dunkelrauschen zu minimieren.

Aus den vorangegangenen Betrachtungen und erhaltenen Messdaten kann für ein einzelnes Pixel zu jedem gemessenen Signalwert eine Messunsicherheit in Form der zu erwartenden Standardabweichung

angegeben werden. Diese Informationen werden im weiteren Verlauf der Arbeit eingesetzt, um ein theoretisches Modell des Sensors für Simulationen zu realisieren.

4.4 Messdatenbasiertes Sensormodell

Wie in Kapitel 4.2 angemerkt, ist die Wahl des Betriebspunktes des Sensors relevant, um so für die jeweilige Applikation die optimale Konfiguration zu finden. Der Betriebspunkt wird durch die analoge Verstärkung der vom Sensor ausgegebenen Spannung bestimmt. In der Regel wird die Verstärkung durch eine Regelung dahingehend optimiert, dass bei einer definierten Anzahl detektierter Photonen der maximale digitale Signalwert erreicht wird. Dieser Vorgang entspricht der Anpassung des maximalen Spannungssignals des Sensors an den Spannungsbereich des Eingangs des Analog-Digital Wandlers.

Da das Rauschen maßgeblich durch die Anzahl generierter Ladungsträger bestimmt wird, ist somit durch die Systemverstärkung das maximale SNR definiert. Ist hinreichend Licht verfügbar, kann die Verstärkung minimiert werden, um die volle Kapazität des Sensors auszunutzen. Jedoch zeigt sich bei einer vollen Ausnutzung der Kapazität des Sensors eine höhere Nichtlinearität. Diese wird hervorgerufen durch die zunehmende elektrische Abschirmung der Vorspannung des einzelnen Pixels. Die effektive Verringerung der Vorspannung spiegelt sich in einer geringeren Quanteneffizienz wider, wodurch letztendlich die Quanteneffizienz eine von der Anzahl der akkumulierten Ladungsträger N_e abhängige Größe wird, was die Nichtlinearität des gemessenen Signals zur Folge hat.

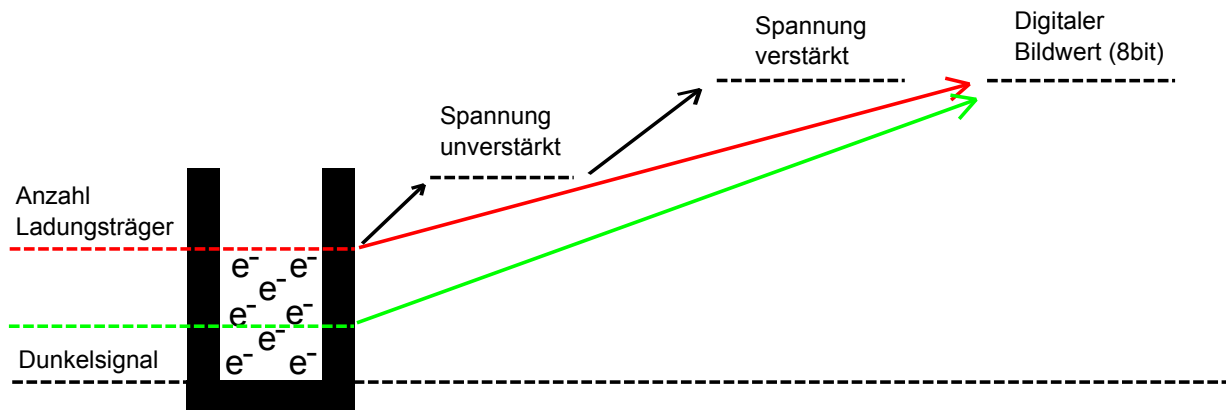


Abbildung 26: Durch die analoge Verstärkung wird die Anzahl der erzeugten Ladungsträger an den digitalen Wertebereich angepasst. Grün entspricht einer höheren Verstärkung und somit einem geringeren SNR . Der digitale Signalwert ist in beiden Fällen identisch, der Dynamikbereich der digitalen Signalauflösung kann somit durch die Anpassung der Analogverstärkung voll ausgenutzt werden.

Um diese Effekte im Detail zu betrachten, wird das Rauschen und die Linearität des Sensors bei minimaler Verstärkung vermessen. Eine Erhöhung der Verstärkung der analogen Spannungssignale kann somit in einem Modell umgesetzt werden, indem ein kleinerer Bereich des vollständigen Dynamikbereichs entsprechend der schematischen Abbildung 26 betrachtet wird. Die Kapazität des Einzelpixels wurde in dieser Messung zu $N_e^{max} = 5 \cdot 10^4$ Ladungsträgerpaaren bestimmt, was einem maximalen SNR von $SNR_{max} = 224$ entspricht. Wie in den folgenden Kapiteln weiter diskutiert wird, findet eine Messung allerdings nicht auf einem einzelnen Pixel statt, sondern es werden Mittelwerte herangezogen.

Beziehungsweise werden kleine Bildauszüge zur weiteren Analyse betrachtet. Dies wirkt sich weiterhin positiv auf die abgeleiteten Messwerte aus. Bei der zeilenkamerabasierten Farbmessung werden Regionen von mindestens 100 Pixeln zur Ableitung eines Messwertes herangezogen, was das Verhältnis zwischen Signal und Rauschen um den Faktor 10 verbessert. Denn die Varianz eines fluktuierenden Signals reduziert sich nach dem zentralen Grenzwertsatz der Statistik [Schwabl, 2006] mit der Wurzel der Anzahl der Mittelungen, bzw. der Anzahl der beitragenden Einzelmessungen. Zur detaillierten Betrachtung der Fortpflanzung des Signalrauschens, unter Miteinbeziehen des angesprochenen Mittelungsprozesses, werden die hier erarbeiteten Messdaten herangezogen.

4.5 Einfluss der Digitalisierung durch die Signaldiskretisierung

Für ein einfaches numerisches Rechenbeispiel wird angenommen, dass eine dreikanalige Farbkamera dieselben spektralen Empfindlichkeiten wie das menschliche Auge besitzt. Somit sind in diesem Fall die gemessenen RGB-Kamerasignale direkt übertragbar in den farbmétrisch nach dem CIE System definierten $CIE - XYZ$ Farbraum, woraus sich wiederum analytisch die $CIE - L^*a^*b^*$ Werte berechnen lassen (Gleichungen 16 - 19). Anhand dieses Beispiels wird in Abbildung 27 entlang der Grauachse des $CIE - L^*a^*b^*$ Farbraums die Farbabweichung zwischen zwei benachbarten entsprechend der digitalen Auflösung unterscheidbaren Farbmesswerten aufgetragen. Zur Berechnung der Daten wurden entlang der Grauachse des $CIE - XYZ$ gleichabständige Farbkoordinaten entsprechend der digitalen Auflösung aufgespannt und die absolute Farbabweichung der nächsten Nachbarn im $CIE - L^*a^*b^*$ Farbraum zueinander bestimmt. Diese farbmétrischen Abweichungen der benachbarten Farbkoordinaten entsprechen somit dem Farbfehler, verursacht durch die gegebene endliche digitale Auflösung.

Hierbei lässt sich erkennen, dass prinzipiell im unteren Helligkeitsbereich ($L^* < 10$) eine höhere Signalauflösung notwendig ist, als im Hellen ($L^* > 70$). Aus dieser einfachen Betrachtung heraus kann abgeschätzt werden, dass mindestens eine Signalauflösung von 12 bit gebraucht wird, um bei dunklen Proben Änderungen unter der Wahrnehmungsschwelle des Menschen ($\Delta E_{76} \approx 1$) auflösen zu können. Hierbei wird vorausgesetzt, dass das Farbmesssystem ein höheres Auflösungsvermögen hinsichtlich Farbänderungen aufzeigen soll als der menschliche Sehapparat.

Diese Betrachtungen müssen allerdings bei der Anwendung auf ein bildgebendes Messsystem noch ausgeweitet werden. Wesentlich ist hierbei, dass Messdaten nicht aus dem Signalwert eines einzelnen Pixels abgeleitet werden, sondern durch eine flächenhafte Mittelung vieler Pixel. Typische Anwendungen in der Druckinspektion arbeiten mit Kameras mit einer optischen Auflösung von $Res = 200 \text{ dpi}$, was einer Pixelkantenlänge auf dem Objekt von $l_{px} = 0.125 \text{ mm/Px}$ entspricht. Messfelder von typischen Druckkontrollstreifen sind ca. $4 \times 4 \text{ mm}$ groß, was in dem konkreten Beispiel 32×32 Pixeln entspricht. Da die Standardabweichung entsprechend der Poisson-Verteilung mit der Wurzel der Anzahl der Einzelmessungen wächst, erhöht sich das SNR direkt linear mit der Kantenlänge des Messfeldes gemessen an der Anzahl der Pixel. Folglich ergibt sich auf dem Messfeld eine 32-fach verbessertes SNR verglichen mit einem einzelnen Pixel. Die Mittelung bewirkt allerdings nur eine höhere Messgenauigkeit, wenn das Rauschen des einzelnen gemessenen Pixelwertes durch die Digitalisierung hinreichend aufgelöst wird. Daher muss das Rauschen, gemessen in der Bitauflösung, einen gewissen Wert übersteigen. Das Rauschen hilft gewissermaßen in diesem Fall, um trotz einer geringen digitalen Auflösung das Signal durch Mittelung verbessern zu können. Um das Verhalten etwas genauer zu untersuchen, kann ein einfaches numerisches Experiment herangezogen werden. Im ersten Schritt wird ein der Normalverteilung entsprechendes statistisch rauschendes Signal $\mu_{y,i}$ erzeugt, welches den definierten Mittelwert von $\bar{\mu}_y^{ref} = 1/N \sum_i \mu_{y,i} = 0.49$ aufweist. Als Datentyp wird für die maximale Auflösung Fließkommazahlen mit doppelter Genauigkeit gewählt (float double). Nun wird das Signal gespreizt und gerundet, um eine variierende digitale Auflösung relativ zur Standardabweichung zu realisieren. Aus diesem numerisch digitalisierten Signal wird nun der Mittelwert $\bar{\mu}_y$ und die Standardabweichung σ_y in Abhängigkeit der Digitalisierungsauflösung bestimmt.

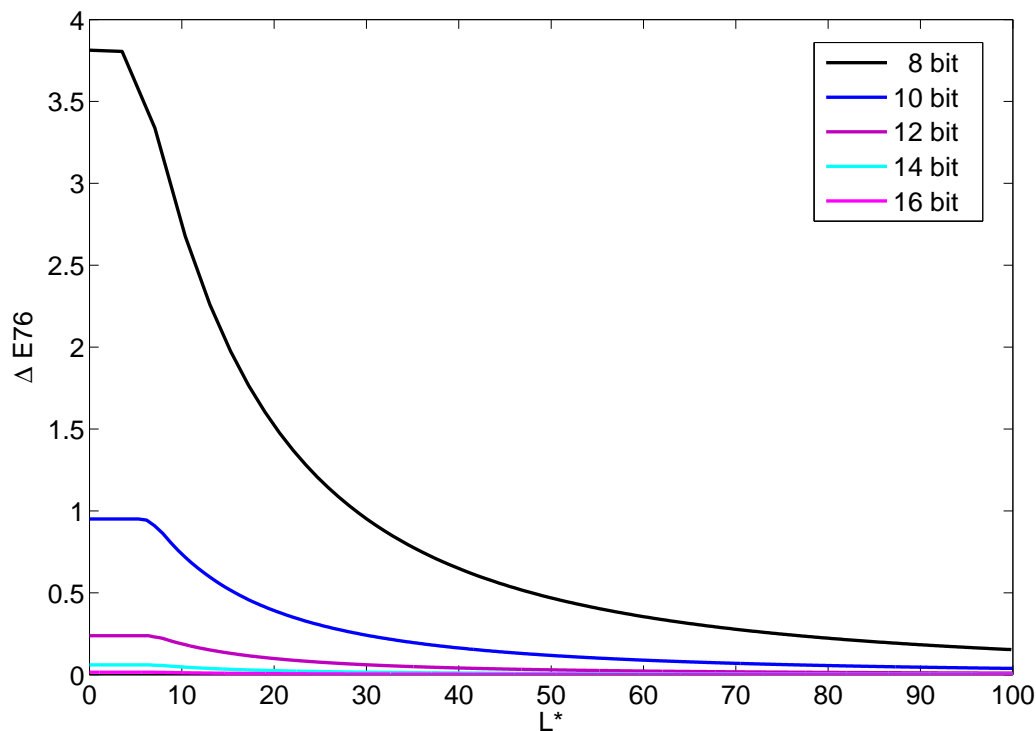


Abbildung 27: Zu sehen sind die aus der Bitauflösung resultierenden Farbfehler zweier entsprechend der digitalen Auflösung benachbarter Grautöne, aufgetragen über die L^* -Achse. Ersichtlich ist, dass bei dunklen Proben eine höhere Bitauflösung benötigt wird als bei hellen Proben. Ab einer Auflösung von 12 bit ist der maximale farbmimetrische Fehler deutlich unter der Wahrnehmungsschwelle von $\Delta E_{76} = 1$.

Der resultierende Sachverhalt ist in Abbildung 28 dargestellt. Auf der linken Seite ist der Mittelwert des digitalisierten Signals über die Standardabweichung, gemessen in Digitalstufen der jeweiligen Signalauflösung, aufgetragen. Der Wert 1 entspricht somit $\sigma_y = 1$ DN. Ersichtlich ist, dass der bestimmte Mittelwert stark verfälscht wird, sobald gilt $\sigma_y < 0.5$ DN, also wenn die Standardabweichung geringer als eine halbe digitale Stufe wird. Gleichermäßen verhält sich die Messung der Standardabweichung σ_y , welche auf der rechten Seite der Abbildung 28 zu sehen ist. Die Messunsicherheit des Rauschens divergiert auch in dem Falle $\sigma_y < 0.5$ DN. Somit müssen bei der Betrachtung des Auflösungsvermögens des Signals nach einer Mittelung das Rauschen und die digitale Auflösung gemeinsam betrachtet werden, um eine Aussage über die erreichbare Genauigkeit treffen zu können. In vielen Fällen werden diese Zusammenhänge nur ungenügend berücksichtigt. Das kann beispielsweise dazu führen, dass die digitale Auflösung des Signals erhöht wird um eine höhere Messgenauigkeit zu erlangen. Oftmals ist diese Herangehensweise aus dem Wunsch nach einer genaueren Messung motiviert, was allerdings nach den hier angestellten Betrachtungen oft nicht nötig ist. Somit wird in diesem Fall die Datenbandbreite erhöht, ohne einen messtechnischen Mehrwert zu generieren.

Das hier vorgestellte numerische Experiment zum Wechselspiel der Mittelwertbildung und der Signaldigitalisierung basiert auf der Annahme eines normalverteilten eindimensionalen Signals. Die hier betrachteten Ergebnisse können auf die Bildauswertung ausgeweitet werden, indem zu dem zeitlichen Rauschen noch eine Inhomogenität der Probenoberfläche mit betrachtet wird. In den folgenden Kapiteln wird abgeleitet, dass der hier verwendete Sensor ein so geringes Rauschen aufweist, dass partiell die betrachteten Effekte der digitalen Auflösung limitieren. Allerdings führen die vorhandenen Inho-

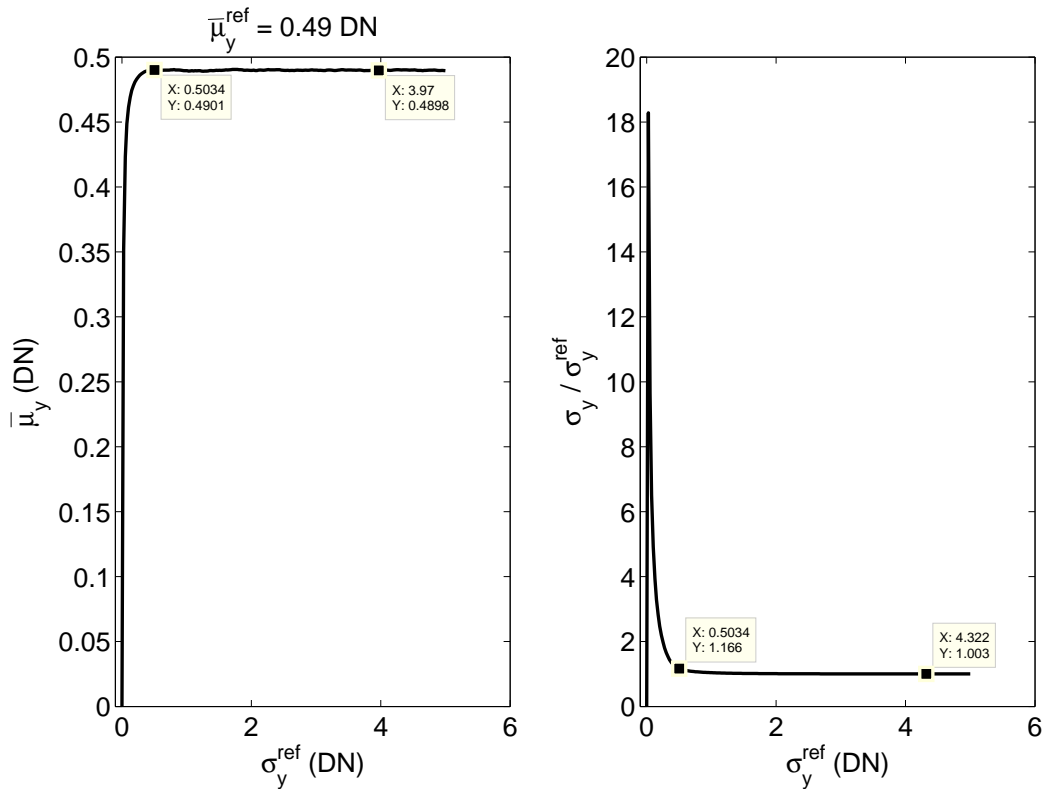


Abbildung 28: Links ist der Mittelwert des Signals $\bar{\mu}_y$ und rechts die numerisch bestimmte Standardabweichung σ_y normiert auf den Referenzwert σ_y^{ref} für ein digitalisiertes Signal mit variierender digitaler Ausflösung zu sehen. Aufgetragen sind die Werte über die Standardabweichung, gemessen in Digitalstufen DN. Die numerische Messung des Mittelwertes und der Standardabweichung ist stark fehlerbehaftet sobald die Standardabweichung des Signals kleiner als eine halbe digitale Stufe wird, also wenn gilt $\sigma_y^{ref} < 0.5$ DN.

mogenitäten der Probenoberflächen wiederum zu einer Streuung des Signals, was eine Erhöhung der Signalauflösung durch Mittelwertbildung wiederum ermöglicht.

4.6 Zusammenfassung

Basierend auf dem linearen Modell nach dem EMVA 1288 Standard und den hier festgelegten messtechnischen Randbedingungen wurde ein Versuchsaufbau und die für Zeilensensoren angepasste Datenauswertung zur Messung der Linearität und des Sensorrauschens entwickelt. Angelehnt an der Photonentransfermethode wurden die Quanteneffizienz und die Systemverstärkung bestimmt, welche die wesentlichen Systemparameter im linearen Kameramodell darstellen. Es wurde weiterhin eine Methode diskutiert, wie die Linearität und das Systemrauschen für weitergehende Simulationen bestimmt werden können. Diese grundlegenden Abhängigkeiten werden in den Kapiteln 5.5 und 6.7 weiter eingesetzt, um fundierte Systemanalysen durchzuführen.



5 Charakterisierung des zeilenkamerabasierten Farbmesssystems

Um verstehen zu können, wie die multispektrale Zeilenkamera als Farbmessgerät eingesetzt werden kann und wo dessen Grenzen und das Optimierungspotential liegen, ist eine detaillierte messtechnische Charakterisierung unumgänglich. Diese wird daher in Abschnitt 5.1 ausführlich behandelt. Als erstes werden die spektralen Systemempfindlichkeiten $\Psi_k^s(\lambda)$ des Systems bestimmt. Bei der im Folgenden beschriebenen Messmethode wird eine breitbandige und leistungsstarke Xenon Hochdruckgasentladungslampe mit einem Monochromator in einzelne schmalbandige, näherungsweise monochromatische Spektren $S_i^{mc}(\lambda)$ zerlegt. Diese werden als kontrollierte Anregungen für die Vermessung der spektralen Kameraempfindlichkeit verwendet. Im Anschluss wird untersucht, wie sich das signalabhängige Rauschen der Kamera (dominiert durch Schrotrauschen, siehe Kapitel 4), die Inhomogenität von typischen Proben und die endliche digitale Auflösung des Bildsignals auf die Farbmessung auswirken. Abschließend wird betrachtet, wie allgemeingültig die hier präsentierte zeilenkamerabasierte Farbmessung ist und auf welchem Wege die Ergebnisse applikationsspezifisch optimiert werden können. Hierbei werden die vorangegangenen Betrachtungen hinsichtlich der Dimensionalität des Farbraums (siehe Kapitel 2.2) herangezogen und auf das hier betrachtete System angewendet.

5.1 Messung der spektralen Systemempfindlichkeiten $\Psi_k^s(\lambda)$

In diesem Abschnitt wird die entwickelte Methodik zur Messung der spektralen Systemempfindlichkeiten der multispektralen Zeilenkamera $\Psi_k^s(\lambda)$ beschrieben. Der Index k läuft hier über die Anzahl der spektralen Kanäle des Systems. Die resultierenden Messdaten werden eingesetzt um anhand des linearen Kameramodells (siehe Gleichung 21) Sensitivitätsanalysen durchzuführen. Weiterhin werden die Daten anhand eines Satzes von Farbproben auf Konsistenz überprüft.

5.1.1 Experimenteller Aufbau

Die wesentlichen Komponenten und deren Aufbau sind in Abbildung 29 dargestellt. Als spektral breitbandige Lichtquelle wird eine Xenon Hochdrucklampe (LOT-Oriel 66000-M) eingesetzt. Die spektrale Leistungsverteilung dieser Lichtquelle wird mittels eines Monochromators (Bentham M300) in kontrollierbare, näherungsweise monochromatische spektrale Leistungsverteilungen $S_i^{mc}(\lambda)$ zerlegt. Ein Spektrometer (Ocean Optics HR2000+) dient als Referenzmessgerät, um über die Messreihe hinweg jede einzelne als Anregung verwendete Verteilung $S_i^{mc}(\lambda)$ zu messen. Zur Kontrolle des genauen Durchmessers und der Position des Messpunktes des Spektrometers, wurde das Spektrometer an eine optische Faser gekoppelt. Wobei deren Austrittsfläche mittels einer abbildenden Optik auf eine Weißreferenz abgebildet wird. Um den genauen Überlapp der Messpositionen der Kamera und des Spektrometers sicher zu stellen, wurde zum Einrichten anstelle des Spektrometers eine LED-Lichtquelle in die optische Faser eingekoppelt. Da der optische Weg über die Faser und die abbildende Optik umkehrbar ist, kann somit mittels der Abbildung des Faseraustritts auf die Weißreferenz die genaue Messposition des Spektrometers durch die Kamera sichtbar gemacht werden. Die abbildende Optik des Spektrometeraufbaus wurde mittels Mikrometerschrauben und einer Dreipunktlagerung auf die exakte Abtastposition der Kamera eingerichtet.

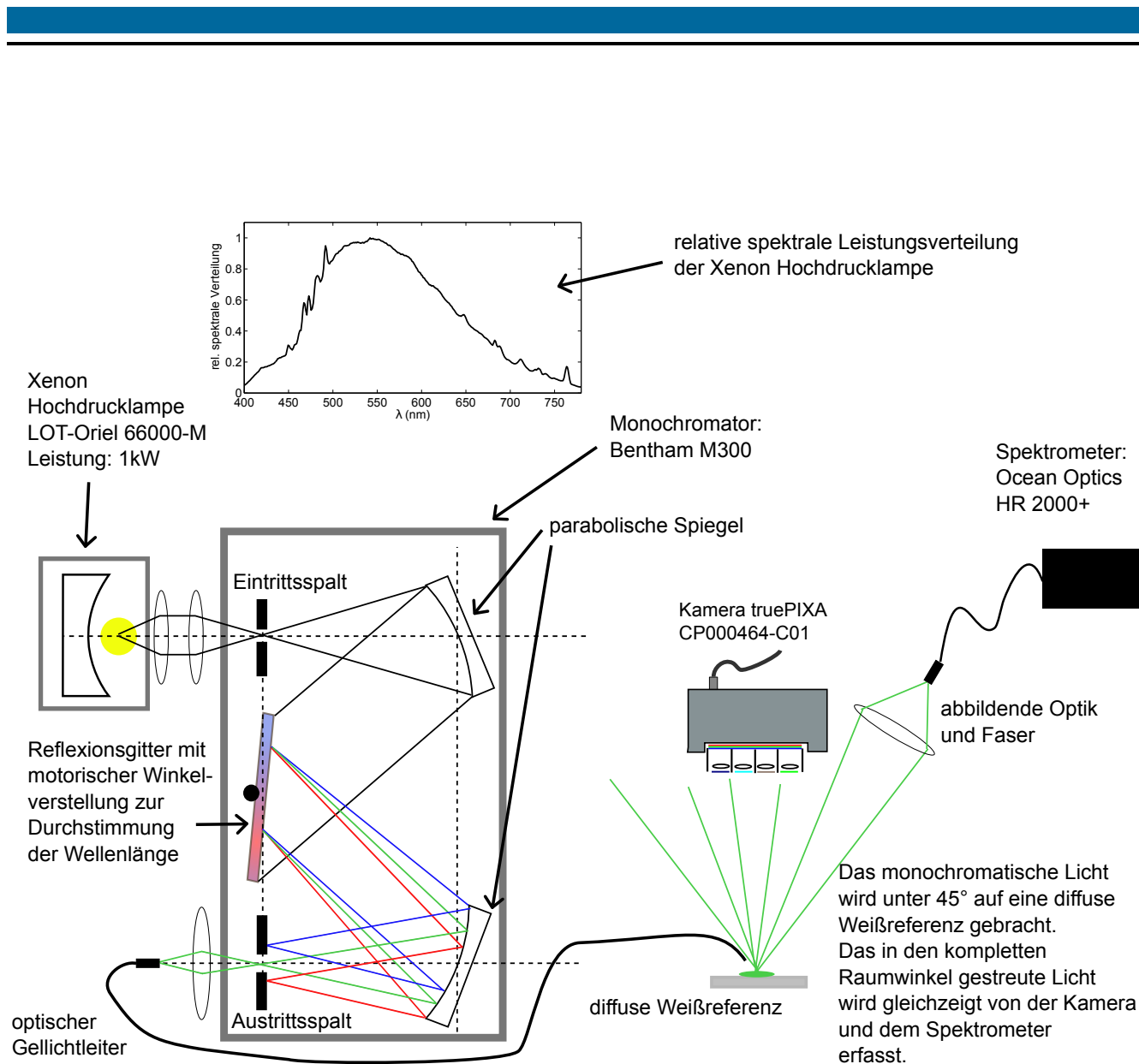


Abbildung 29: Zu sehen ist der experimentelle Aufbau zur Vermessung der spektralen Systemempfindlichkeiten $\Psi_k^s(\lambda)$. Eine breitbandige Xenon Hochdrucklampe (LOT-Oriel 66000-M, $P = 1 \text{ kW}$) wird auf den Eintrittsspalt des Monochromators (Bentham M300) abgebildet. Über zwei parabolische Spiegel mit einer Brennweite von $f = 300 \text{ mm}$ und einem Reflexionsgitter wird der Eintrittsspalt auf den Austrittsspalt abgebildet. Mittels einer motorischen Winkelverstellung kann die Wellenlänge, der auf dem Austrittsspalt abgebildeten spektralen Leistungsverteilung $S_i^{mc}(\lambda)$, automatisiert durchgestimmt werden. Das näherungsweise monochromatische Licht wird in einen hochgradig transmittierenden Gellichtleiter eingekoppelt. Das monochromatische Licht wird mit dem Gellichtleiter unter einem Winkel von 45° auf eine diffuse Weißreferenz ausgekoppelt. Das von der diffusen Weißreferenz in den gesamten Halbraum gestreute Licht wird zeitgleich von der Kamera und dem Spektrometer (Ocean Optics HR2000+) erfasst. Durch die zeitgleiche Erfassung unter der näherungsweise selben Messgeometrie sind die Messbedingungen der Kamera und des Spektrometers möglichst identisch gehalten.

Da der Grünkanal der Kamera geometrisch zwischen dem Rot- und dem Blaukanal angeordnet ist, wurde die abbildende Optik so einjustiert, dass auf dem Grünkanal das Signalmaximum erreicht wird. Anschließend wurde der Austritt der Lichtleitfaser, in welcher die monochromatische Lichtquelle eingekoppelt wird, wiederum auf das Spektrometer eingerichtet, um hier ebenfalls das maximale Signal zu erhalten. Durch diese Schritte kann sichergestellt werden, dass die maximale Bestrahlungsstärke durch das monochromatische Licht gleichzeitig auf die Messposition des Spektrometers und der Kamera fällt. Die Faser des Spektrometers hat einen Durchmesser von $200\,\mu\text{m}$. Der Durchmesser wird mit einem Abbildungsmaßstab $\beta \approx 1/3$ abgebildet, was somit zu einem Durchmesser des Messfeldes von $600\,\mu\text{m}$ führt. Der geometrische Versatz der R, G und B-Zeilen beträgt jeweils viermal den Pixelabstand in Zeilenrichtung. Bei einer optischen Auflösung von 100 dpi ergibt sich somit ein Abstand der Kamerazeilen auf dem Objekt von $\approx 1\text{ mm}$. Somit muss gewährleistet werden, dass über diesen Bereich die Objektoberfläche homogen ausgeleuchtet wird. In diesem Fall kann gewährleistet werden, dass die drei Farbkanäle mit dem identischen Signal angeregt werden. Da der Austritt des Gellichtleiters nicht auf die Oberfläche der Weißreferenz abgebildet wird, lässt sich durch die divergente Abstrahlung der Durchmesser der beleuchteten Fläche direkt über den Abstand des Gellichtleiters zu Oberfläche einstellen. Es muss allerdings davon ausgegangen werden, dass die einzelnen Zeilen der Kamera auf ihrem Betrachtungsort eine unterschiedliche Bestrahlungsstärke abbilden. Das stellt kein Problem dar, solange die Verteilung der Bestrahlungsstärke über die Messung im Ort stabil bleibt. Eine anschließende Normierung der gemessenen Amplituden kann in diesem Fall die Abweichungen kompensieren.

Erste Messungen, bei welchen kein Gellichtleiter zur Einkopplung des monochromatischen Lichtes verwendet wurde, haben genau aus diesem Grund Probleme bei der Auswertung gezeigt. Der Grund liegt darin, dass der Austrittsspalt des Monochromators direkt auf die Oberfläche der Weißreferenz abgebildet wurde. Am Austrittsspalt sind die spektrale Verteilung sowie die Strahlungsleistung über den Ort nicht konstant. Diese Inhomogenitäten bleiben durch die optische Abbildung erhalten und führen daher zu starken messtechnischen Abweichungen bei der Bestimmung der spektralen Systemempfindlichkeiten. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde der Austrittsspalt des Monochromators in einen breitbandig hoch transmittierende Lichtleiter mit Gelkern eingekoppelt, welche technologisch aus dem Anwendungsfeld der UV-Klebstoffaushärtung stammen. Mit dieser Herangehensweise konnte durch die in der Faser auftretende interne Vielfachreflexion das Licht in der Leistungs- und in der Wellenlängenverteilung homogenisiert werden. Zusätzlich kann durch den Einsatz des Gellichtleiters die Lichtleistung sehr effizient, platzsparend und ohne weitere optische Komponenten präzise auf den Messort eingerichtet werden. Die Homogenität der beleuchteten Fläche wurde mit dem Spektrometer in weitergehenden Messungen validiert. Die genannte Einrichtung zur Justage des Messfeldes des Spektrometers wurde hier eingesetzt, um das ausgeleuchtete Messfeld lateral zu erfassen.

5.1.2 Berechnungen und Normierungen

Eine große Herausforderung liegt in der präzisen Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit der multispektralen Zeilenkamera. Denn nur mit einer sehr präzisen Messung ist es möglich, das zu erwartende Kamerasignal für eine definierte Farbprobe nach Gleichung 21 zu bestimmen. Außerdem gestaltet es sich problematisch aus den Messdaten des Spektrometers eine absolute spektrale Leistungsverteilung mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen. Sehr viel einfacher sind Messungen von relativen Änderungen, wie beispielsweise bei der Messung der Transmission und der Reflexion von Materialproben. Wird in einer Messung nur eine relative wellenlängenabhängige Änderung des Signals gemessen, kann zyklisch in der Messung auf eine Referenz normiert werden. Die Normierung findet im Falle einer Transmissionsmessung durch eine zyklische Referenzmessung der spektralen Leistungsverteilung der Lichtquelle statt. Farbmessgeräte nutzen als Referenz die Messung der Reflexion einer definierten, bekannten weißen Farbprobe. Diese Referenzierung ermöglicht es, die zeitlichen Veränderungen der verwendeten Lichtquelle und des Spektrometers aus der Messung zu eliminieren.

Auch zertifizierte Normlichtquellen wurden als Referenz für die Herstellung eines absoluten Bezugs in der Messung des Spektrometers in Betracht gezogen. Verfügbare, wirtschaftlich erschwingliche Lichtquellen sind allerdings nur auf eine verbleibende Messunsicherheit von $\pm 5\%$ spezifiziert, was für die hier angezielten Genauigkeiten nicht hinreichend ist. Zusätzlich werden meist thermische Strahler als Referenzquelle eingesetzt, welche im blauen Spektralbereich ($\lambda < 475 \text{ nm}$) eine sehr geringe spektrale Leistungsdichte aufweisen. Dies wiederum bringt eine nicht zu vernachlässigende Messunsicherheit mit sich. Im Folgenden wird gezeigt, dass für die Voraussage des Kamerasignals mittels des linearen Modells (siehe Gleichung 21) für eine definierte Farbprobe mit der spektralen Reflexion $R(\lambda)$ eine Messmethode entwickelt werden kann, welche im Kern keine absoluten Referenzen benötigt. Möglich ist Letzteres, da auch die Messung einer Reflexion nur eine relative Änderung eines Signals bedeutet. Die Reflexion $R(\lambda)$ ist definiert als die relative Rückstreuung einer Farbprobe bezogen auf eine perfekte, weiße, lambertsch streuende Probe.

Urban [2005] behandelt einige mathematische Ansätze zur Rekonstruktion der Systemempfindlichkeit $\Psi_k^s(\lambda)$ (siehe Gleichung 22). Problematisch ist bei den diskutierten Herangehensweisen allerdings, dass die Reflexionen von Farbproben nur einen stark eingeschränkten Funktionenraum umfassen. Daher verbleibt bei diesen Methoden eine nicht unbeachtliche Unsicherheit, da ein schlecht gestelltes Gleichungssystem gelöst wird. Ein schlecht gestelltes Gleichungssystem zeichnet sich dadurch aus, dass es nicht ohne weitere Kenntnisse über das System eindeutig gelöst werden kann. Typische Lösungsansätze verwenden allgemeine Bedingungen in Form einer Regularisierung, um eine physikalisch sinnvolle Lösung des Gleichungssystems zu erzwingen. Die so bestimmte Systemempfindlichkeit kann das Verhalten der Kamera innerhalb des Farbraums, welcher zur Charakterisierung eingesetzt wurde, in guter Näherung beschreiben. Allerdings zeigen sich Probleme bei der Anwendung. Alternativ können wir von Gleichung 21 ausgehend als Beleuchtungsspektrum eine beliebig schmale Verteilung annehmen. Diese kann beschrieben werden als eine Dirac- δ Funktion, welche sich dadurch auszeichnet, dass sie nur genau bei dem Argument 0 von 0 verschieden ist. Das Integral ist normiert auf 1, also $\delta(\lambda - \lambda') = 0 : \lambda \neq \lambda'$ und $\int \delta(\lambda - \lambda') d\lambda = 1$. Somit ergibt sich mit $S_b(\lambda) = \delta(\lambda - \lambda')$:

$$K_k(\lambda') = \int_{\lambda} \Psi_k(\lambda) R(\lambda) \delta(\lambda - \lambda') d\lambda = \Psi_k(\lambda') R(\lambda') \quad (46)$$

Bei bekannter Reflexion R der Farbprobe an der Stelle λ' , lässt sich die spektrale Empfindlichkeit zur Wellenlänge λ' einfach bestimmen zu:

$$\Psi_k(\lambda') = \frac{K_k(\lambda')}{R(\lambda')} \quad (47)$$

Dieser Zusammenhang beschreibt die generelle Idee der messtechnischen Abtastung der spektralen Empfindlichkeit der k -Kanäle der Kamera mit einer spektral durchstimmbaren Lichtquelle. Die zur Abtastung eingesetzten spektralen Leistungsverteilungen sollten eine möglichst geringe Bandbreite aufweisen und den gesamten zu vermessenden (sichtbaren) Wellenlängenbereich abdecken. Jede physikalisch realisierbare Lichtquelle weist jedoch eine endliche spektrale Bandbreite auf. Somit ist eine perfekte δ -Funktion in der Messung nicht einfach realisierbar. Prinzipiell wären durchstimbare CW-Laser (CW: 'continuous wave') als Lichtquelle mit extrem geringer Bandbreite denkbar. Allerdings konnte keine kommerziell verfügbare Lichtquelle gefunden werden, welche den gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich abdeckt. Zusätzlich sind keine starken Änderungen der spektralen Empfindlichkeiten innerhalb weniger Nanometer Variation der Wellenlänge zu erwarten. Die der Kamera zugrunde liegende spektrale Empfindlichkeit der Siliziumdiode zeigt keine steilen Flanken. Die eingesetzten Farbfilter lassen auch keine starke Signaländerung über einen geringen Wellenlängenbereich erwarten, weswegen mit einer endlichen Bandbreite von wenigen Nanometern die spektralen Empfindlichkeiten mit hinreichender Auflösung abgetastet werden können.

Außerdem muss zur vollständigen Bestimmung der spektralen Empfindlichkeiten eine hinreichende Anzahl einzelner Spektren verwendet werden, um den gewünschten Messbereich mit einer hinreichenden Datendichte abzutasten. Es kann also die Annahme getroffen werden, dass keine unendlich geringe

Bandbreite bei der Abtastung der spektralen Empfindlichkeit benötigt wird. Sondern die Bandbreite der verwendeten Beleuchtungsspektren muss nur hinreichend gering sein, sodass die zu erwartenden spektralen Veränderungen der Kameraempfindlichkeiten hinreichend aufgelöst werden. Hierbei ist es wichtig zu wissen, dass in der eingesetzten Kamera ausschließlich auf Absorption basierende optische Filter eingesetzt werden, welche prinzipbedingt keine extrem steilen Flanken aufweisen. In dem Versuchsaufbau wurde die Bandbreite der näherungsweise monochromatischen Spektren $S_i^{mc}(\lambda)$ so gewählt, dass diese gering genug ist, um die spektralen Abhängigkeiten der spektralen Empfindlichkeit der Kanäle aufzulösen. Jedoch muss auch das gemessene Kamerasignal hoch genug sein, sodass ein hinreichend geringes Rauschen bei endlicher Messzeit erzielt werden kann. In Abbildung 30 sind über den sichtbaren Wellenlängenbereich drei Spektren dargestellt. Die Bandbreite $\delta\lambda$ wurde über die Standardabweichung einer angenäherten Gaußverteilung bestimmt:

$$S_i^{mc}(\lambda) \approx c(\lambda'_i) \cdot \frac{1}{\delta\lambda\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda-\lambda'_i}{\delta\lambda_i}\right)^2} \quad (48)$$

$c(\lambda'_i)$ beschreibt die von der Zentralwellenlänge λ' abhängige Amplitude des Signals. Die Anpassung der Messdaten unter Verwendung von Gleichung 48 ist in Abbildung 30 dargestellt. Die Bandbreite wurde über das Modell bestimmt zu $\delta\lambda_i = 4.8\text{ nm} \dots 4.9\text{ nm}$, wobei drei Messwerte über den sichtbaren Wellenlängenbereich betrachtet wurden.

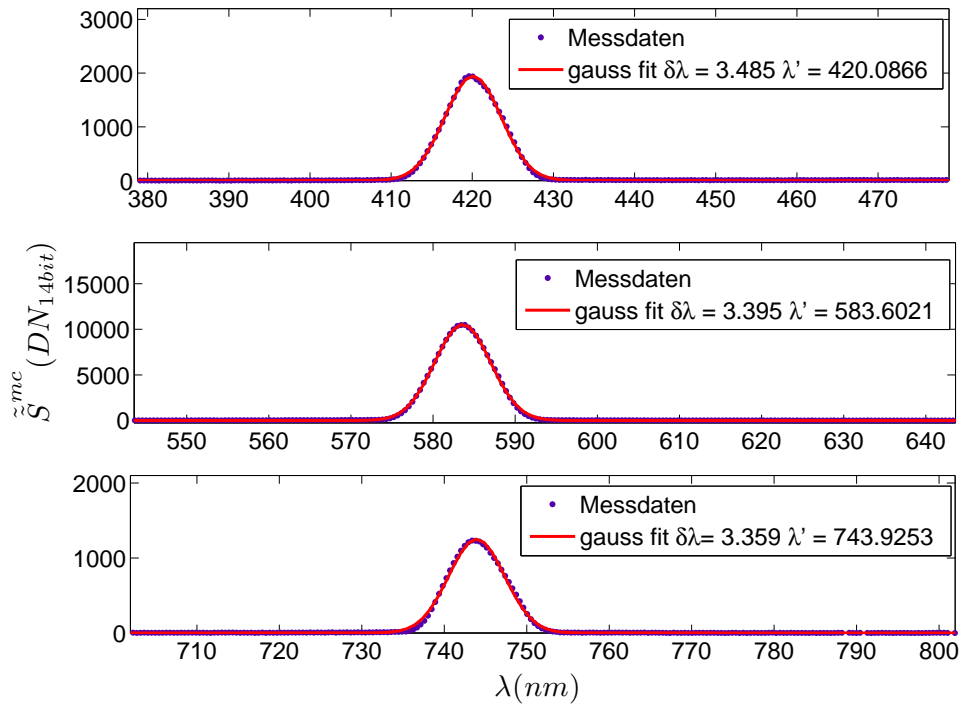


Abbildung 30: Aufgetragen sind die Messdaten des Referenzspektrometers im Falle von drei monochromatische Spektren über die Wellenlänge des Lichtes λ . Die drei Grafen zeigen exemplarische Daten, wobei diese so gewählt wurden, dass die Randbereiche und die Mitte des erfassten sichtbaren Wellenlängenbereichs repräsentiert werden. Die spektralen Verteilungen wurden mit einer Normalverteilung nach Gleichung 48 angepasst. In der Beschreibung sind die jeweilige ermittelte Bandbreite $\delta\lambda$ und die Zentralwellenlänge λ' eingetragen. Ersichtlich ist, dass die jeweilige spektrale Verteilung sehr gut durch eine Normalverteilung beschrieben werden kann und die Bandbreite $\delta\lambda$ über den gesamten Wellenlängenbereich nur geringfügig variiert.

Mit dieser entsprechenden Bandbreite $\delta\lambda$ sind die innerhalb der Messung bestimmten spektralen Empfindlichkeiten der einzelnen Kanäle tiefpassgefiltert, da zu jedem einzelnen Messpunkt die Empfindlichkeit nur als gewichteter Mittelwert über die Bandbreite des zur Anregung verwendeten Spektrums gemessen werden kann. Mathematisch entspricht die Messung einer Faltung der spektralen Empfindlichkeiten mit dem näherungsweise monochromatischen, gaußförmigen Spektrum.

$$K_k(\lambda'_i) = \int_{\lambda} \Psi_k(\lambda) R(\lambda) c(\lambda'_i) \frac{1}{\delta\lambda\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda-\lambda'_i}{\delta\lambda}\right)^2} d\lambda \quad (49)$$

Weiterhin wird für die Messung der spektralen Empfindlichkeiten eine weiße Probe mit möglichst konstanter Reflexion gewählt. Somit gilt insbesondere über die betrachtete Bandbreite der verwendeten Lichtquelle $\delta\lambda$, dass die Reflexion hier als konstant angenommen werden kann: $R(\lambda - \delta\lambda) \approx R(\lambda + \delta\lambda)$.

$$K_k(\lambda'_i) = R(\lambda'_i) \int_{\lambda} \Psi_k(\lambda) \cdot c(\lambda'_i) \frac{1}{\delta\lambda\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda-\lambda'_i}{\delta\lambda}\right)^2} d\lambda = R(\lambda'_i) \cdot c(\lambda'_i) \cdot \tilde{\Psi}_k(\lambda'_i) \quad (50)$$

Hier ist $\tilde{\Psi}_k(\lambda'_i)$ die durch die endliche Bandbreite der eingesetzten monochromatischen Spektren tiefpassgefilterte Empfindlichkeit:

$$\tilde{\Psi}_k(\lambda'_i) = \int_{\lambda} \frac{1}{\delta\lambda\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda-\lambda'_i}{\delta\lambda}\right)^2} \Psi_k(\lambda) d\lambda \quad (51)$$

Die Tiefpassfilterung erfolgt durch die Faltung der wirklichen Kanalempfindlichkeit des Systems mit der spektralen Verteilung, hier angenähert durch eine normierte Gaußsche Normalverteilung. Nun kann die Näherung $\tilde{\Psi} \approx \Psi$ durchgeführt werden. Diese bezieht sich auf der Annahme einer hinreichend geringen Bandbreite der Spektren $S^{mc}(\lambda'_i)$, aufgrund deren keine nennenswerte Tiefpasswirkung durch die endliche Bandbreite der einzelnen Spektren zu erwarten ist. Die Systemempfindlichkeit ergibt sich somit näherungsweise zu:

$$\rightarrow \Psi_k(\lambda'_i) \approx \tilde{\Psi}_k(\lambda'_i) = \frac{K_k(\lambda'_i)}{R(\lambda'_i) \cdot c(\lambda'_i)} \quad (52)$$

Somit wurde gezeigt, wie durch die vorgestellte Messung eine gute Näherung der spektralen Empfindlichkeiten abgeleitet werden kann. Nun wird noch betrachtet, wie mit der Unzulänglichkeit umgegangen werden kann, dass das verwendete Spektrometer keine absoluten Messwerte der spektralen Leistungsdichte ausgeben kann, beziehungsweise die Umrechnung auf absolute Einheiten nur mit unzureichender Genauigkeit durchgeführt werden kann. Es wird hierzu angenommen, dass das Signal des Spektrometers bei jeder Wellenlänge (entspricht hier den einzelnen Pixeln des Zeilensensors des Spektrometers) linear zur eingekoppelten optischen Leistung ist und die Wellenlängenachse korrekt kalibriert wurde. Beide Eigenschaften wurden hierfür detailliert untersucht. Die Linearität wird durch eine nachgeschaltete Verarbeitung hinreichend korrigiert. Die Parameter des Herstellers zur Korrektur der Linearität wurden weiterhin durch detaillierte Messungen optimiert. Es ergibt sich, dass durch eine einfache wellenlängenabhängige Korrekturfunktion $F_s(\lambda)$ zwischen dem physikalischen Spektrum $S(\lambda)$ und dem gerätespezifischen ausgegebenem Spektrum $\tilde{S}(\lambda)$ umgerechnet werden kann:

$$\tilde{S}(\lambda) = S(\lambda) \cdot F_s(\lambda) \quad (53)$$

Wobei hier $F_s(\lambda)$ die spektrale Empfindlichkeit des Spektrometers darstellt. Das bedeutet, dass die eingekoppelte spektrale Leistungsdichte der Einheit $[S(\lambda)] = W/nm$ als ein einheitenlosen gerätespezifischen digitaler Wert $[\tilde{S}] = DN$ mit der Effizienz $[F_s(\lambda)] = DN \cdot nm/W$ gemessen wird.

Mit dem Spektrometer werden in dem gesamten Messablauf die einzelnen Spektren $S_i^{mc}(\lambda)$ vermessen. Zudem wird am Schluss des Messablaufs das Spektrum der breitbandigen LED-Zeilenbeleuchtung erfasst. Alle Datensätze werden indirekt über die Weißreferenz aufgenommen. Somit ergibt sich das aufgenommene Signal des Spektrometers zu:

$$\tilde{S}(\lambda) = \tilde{S}(\lambda) \cdot R(\lambda) = S(\lambda) \cdot F_s(\lambda) \cdot R(\lambda) \quad (54)$$

Insbesondere können wir somit schreiben:

$$S_b(\lambda'_i) = \frac{\tilde{S}_b(\lambda'_i)}{F_s(\lambda'_i) \cdot R(\lambda'_i)} \quad (55)$$

Aufgrund der gewählten Normierung ergibt sich die Leistung $c(\lambda'_i)$ zu:

$$c(\lambda'_i) = \int_{\lambda} S_i^{mc}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda} \frac{\tilde{S}_i^{mc}(\lambda)}{F_s(\lambda) \cdot R(\lambda)} d\lambda \approx \frac{1}{F_s(\lambda'_i) \cdot R(\lambda'_i)} \int_{\lambda} \tilde{S}_i^{mc}(\lambda) d\lambda \quad (56)$$

Wobei die Näherung auf der Annahme basiert, dass über die Bandbreite $\delta\lambda$ die Weißreferenz und die Empfindlichkeit des Spektrometers nur sehr schwach variieren.

Nun kann weiterhin verwendet werden, dass nach Gleichung 22 das Kamerasignal aus dem Produkt des Beleuchtungsspektrums mit der spektralen Empfindlichkeit bestimmt wird. Also ist es für eine Voraussage des Kamerasignals hinreichend die Systemempfindlichkeit Ψ_k^s zu bestimmen:

$$\rightarrow \Psi_k^s(\lambda'_i) = \frac{K_k(\lambda'_i) \cdot S_b(\lambda'_i)}{R(\lambda'_i) \cdot c(\lambda'_i)} = \frac{K_k(\lambda'_i) \cdot \frac{\tilde{S}_b(\lambda'_i)}{F_s(\lambda'_i) \cdot R(\lambda'_i)}}{R(\lambda'_i) \cdot \frac{1}{F_s(\lambda'_i) \cdot R(\lambda'_i)} \int_{\lambda} \tilde{S}_i^{mc}(\lambda) d\lambda} = \frac{K_k(\lambda'_i) \cdot \tilde{S}_b(\lambda'_i)}{R(\lambda'_i) \cdot \int_{\lambda} \tilde{S}_i^{mc}(\lambda) d\lambda} \quad (57)$$

Es kann also die Systemempfindlichkeit zu jeder der i Einzelmessung bei λ'_i ohne eine absolute Kalibrierung des Spektrometers abgeleitet werden. Lediglich die genaue Reflexion der Weißreferenz muss vermessen werden. Hierzu wird ein konventionelles Farbmessgerät eingesetzt. Es wurde mit einem FD7 der Firma *Konica Minolta* gearbeitet.

Der wesentliche Vorteil der hier vorgestellten Betrachtungsweise liegt darin, dass keine weitere Kalibrierung des Spektrometers, welche naturgemäß weitere Unsicherheiten in die Auswertung mit einbringt, herangezogen werden muss. Trotzdem lässt sich auf diese Weise eine absolute Messung der spektralen Empfindlichkeiten realisieren. Die einzige Voraussetzung ist die zeitliche Stabilität der spektralen Empfindlichkeit des Spektrometers. Um diese sicherzustellen, wurde das Spektrometer nach Rücksprache mit einem Techniker des Geräteherstellers ca. eine Stunde vor jeder Messreihe in Betrieb genommen, sodass sich bei Beginn der Messung das Spektrometer in einem thermisch stabilen Zustand befindet. Im Folgenden kann gezeigt werden, dass diese Methode zu sehr robusten Ergebnissen führt. Die Signalantwort der multispektralen Zeilenkamera kann auf Basis der so erlangten Messdaten unter Kenntnis der Reflexion der Farbprobe in guter Näherung berechnet werden.

5.1.3 Auswertung der Messdaten

Mittels des einstellbaren Winkels des Reflexionsgitters wird die Zentralwellenlänge λ'_i in $i = 1 \dots 360$ Schritten über den gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich verschoben. Der erfasste Wellenlängenbereich und die Schrittweite ist in Abbildung 33 dargestellt. Die Bandbreite $\delta\lambda$ wurde exemplarisch an drei Stellen des erfassten Spektralbereiches vermessen. Das Ergebnis ist in Abbildung 30 zu sehen, die eingestellte Bandbreite liegt bei etwa $\delta\lambda = 3.4 \dots 3.5$ nm. Bei der Einstellung der Bandbreite mittels der

einstellbaren Schlitzblenden, wurde die Bandbreite so gering wie möglich gewählt, um die Tiefpasswirkung auf die spektrale Empfindlichkeit der Kanäle möglichst gering zu halten. Allerdings darf die Blende nicht beliebig schmal gewählt werden, da sonst die Bestrahlungsstärke zu gering wird und somit entweder das Rauschen in der Messung oder die Messzeit durch längere Integrationszeiten des Spektrometers und der Kamera sehr hoch wird.

Eine zu hohe Dauer des gesamten Messablaufs sollte aufgrund von langsamen zeitlichen Variationen vermieden werden. Die Parameter wurden so eingestellt, dass der gesamte Messreih innerhalb von ca. 60 min aufgenommen werden kann. Ein Messschritt mit Datenaufnahmen (Bild- und Spektrometerdaten) und das Verstellen des Gitters nimmt somit ca. 10 s in Anspruch. Aufgrund von optischen Abbildungsfehlern im Aufbau lässt sich die Bandbreite $\delta\lambda$ nicht beliebig verringern. Messungen haben gezeigt, dass bei einer weiteren Verringerung der Breite der Schlitzblende die Bandbreite nicht wesentlich geringer wird. Hauptsächlich wird nur noch die Amplitude des Signals reduziert. Das Verhalten kann mit der endlichen Wellenlängenauflösung des Monochromators erklärt werden.

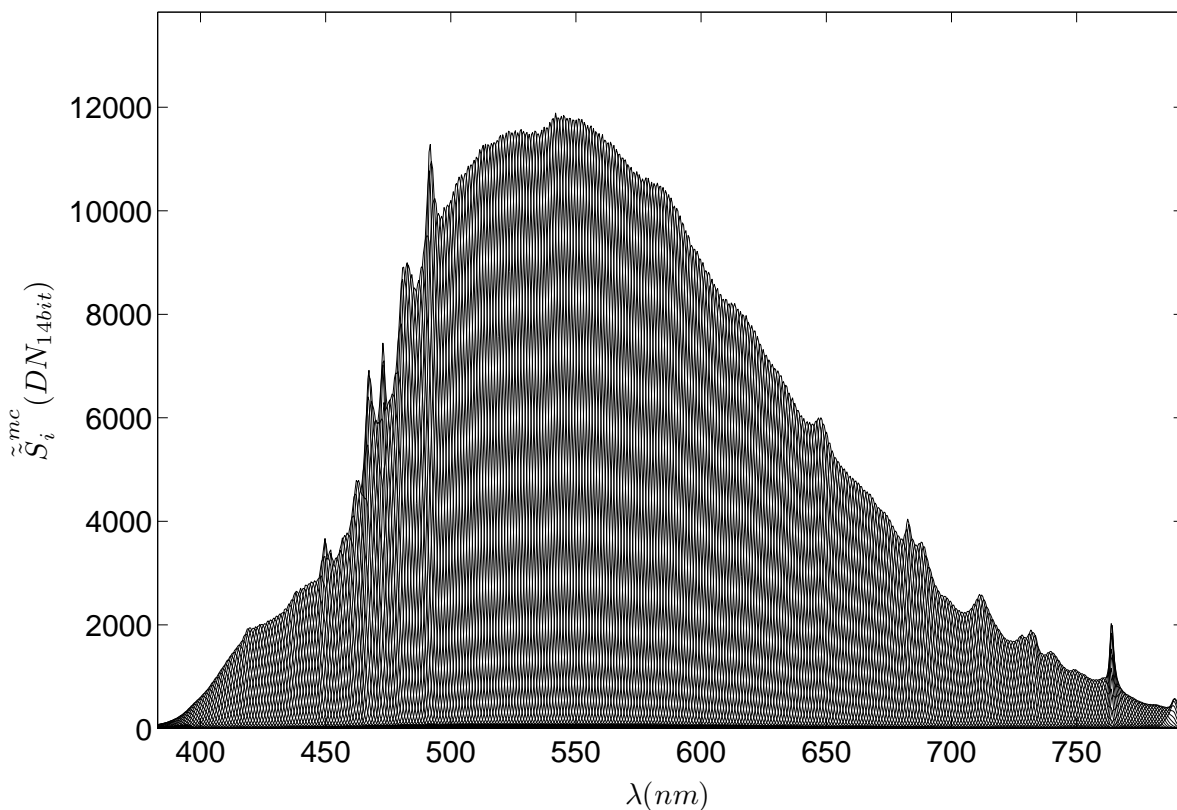


Abbildung 31: Zu sehen ist die Überlagerung aller 360 einzelner Spektrometermessungen $\tilde{S}_i^{mc}(\lambda)$, welche innerhalb einer Messreihe aufgenommen wurden. Die Einhüllende aller Spektren spiegelt die Einhüllende des Spektrums der Xenon Hochdrucklampe wider, welche hier mit der Empfindlichkeit des Spektrometers gewichtet ist.

In Abbildung 31 sind alle gemessenen Spektren $\tilde{S}_i^{mc}(\lambda)$ in einer Grafik dargestellt. Erkennbar ist hier durch die Einhüllende der grundlegende Verlauf des zur Messung verwendeten Eingangsspektrums der Xenon-Hochdrucklampe, welches hier allerdings überlagert ist mit der Empfindlichkeit $F_s(\lambda)$ des Spektrometers. Unterhalb von $\lambda = 450$ nm und oberhalb von $\lambda = 700$ nm fällt das gemessene Signal stark ab, was einerseits durch die typische Quanteneffizienz der Silizium basierten Sensoren zu erklären ist, andererseits tragen hier die Transmission der einzelnen optischen Komponenten bei, sowie die Auslegung der Blaze-Winkel der Reflexionsgitter des Monochromators und des Spektrometers. Da die meisten

Spektrometer einen größeren Wellenlängenbereich als einen Faktor zwei zwischen der kleinsten und der größten Wellenlänge erfassen, ist es in den Randbereichen des spektralen Erfassungsbereiches notwendig, die zweite Beugungsordnung des Gitters zu unterdrücken. Hierzu wird häufig ein zusätzlicher Bandpassfilter eingesetzt, welcher zu weiteren Verlusten und somit zu einem geringeren Signal führen kann. Durch eine gezielte Herstellung der Winkel der reflektierenden Flächen eines Reflexionsgitters, kann die bevorzugte Reflexionsrichtung mit der gewünschten Beugungsordnung zusammen geführt werden und somit die Effizienz des Gitters stark erhöht werden [Hobbs, 2009]. Prinzipiell muss bei der weiteren Interpretation der Daten berücksichtigt werden, dass im tief blauen und roten Spektralbereich die Messunsicherheit durch die genannten Gründe höher ist. Dieser Sachverhalt wird insbesondere relevant, wenn die Genauigkeit der berechneten Kamerasignale unter Verwendung der gemessenen spektralen Empfindlichkeit der Kanäle betrachtet wird.

Ein wesentlicher Punkt in der Auswertung liegt darin, die Zentralwellenlänge λ'_i jeder einzelnen Teilmessung möglichst präzise zu extrahieren, woraus sich die Wellenlängenachse λ' der Messung ergibt. Das Gitter wird durch einen Schrittmotor rotiert, wobei bei jeder Messung die identische Anzahl von Schritten (was einer konstanten Winkeländerung entspricht) gefahren werden. Daher ist aufgrund der Toleranzen des Monochromators mit einer sich über das Spektrum hinweg ändernden Verschiebung der monochromatischen Spektren zu rechnen. Zur Bestimmung der Wellenlängenachse wurden mehrere Ansätze verglichen. Die einfachste Methode besteht darin, das Maximum jedes Spektrums $\max(\tilde{S}^{mc})$ zu bestimmen und die zugehörige Wellenlänge als Referenzwert zu verwenden. Diese Auswertung ist allerdings stark rauschanfällig, da hierbei nur ein Messwert des Spektrometerdatensatzes herangezogen wird. Ein weiterer naheliegender Ansatz liegt in der Annäherung jedes Spektrums an eine Gaußverteilung, aus welcher mittels des resultierenden Modellparameters die Wellenlänge bestimmt werden kann (vergleiche Abbildung 30).

Wie in Abbildung 31 gut erkennbar ist, zeigt das Spektrum der Xenon Hochdrucklampe noch einige schmalbandige Spitzen. Diese sind nicht zu vermeiden, da das physikalische Prinzip der Gasentladungslampen auf diskreten energetischen Übergängen der Elektronen des Xenons beruht. Die natürliche Linienbreite der Gasemissionslinien hängt im wesentlichen von der Lebensdauer des jeweiligen angeregten elektronischen Zustandes ab. Über die Heisenbergsche Unschärferelation ist die Bandbreite mit der Lebensdauer verknüpft: $\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar/2$ [Heisenberg, 1927]. Bei geringem Druck, also einer geringen Anzahl von Gasatomen in einem Volumen, ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Gasatome miteinander wechselwirken sehr gering. Die daraus resultierende Lebenszeit Δt des jeweiligen angeregten Zustandes führt zu einer geringen energetischen Bandbreite ΔE . Eine geringe Bandbreite ist daher gleichbedeutend mit der Aussage, das sehr präzise vorausgesagt werden kann, mit welcher Energie, also mit welcher Wellenlänge, ein Photon emittiert wird. Hingegen bedeutet eine lange Lebenszeit des Zustandes, dass der Zeitpunkt der Emission nicht genau bestimmt ist. Wird die Bandbreite einer Emissionslinie gemessen, besteht das Signal aus einer Mittelung über viele einzelne Emissionen. Gemessen wird also die Verteilung der bei der Emission auftretenden Energie, welche exakt der energetischen Bandbreite des Signals entspricht. In Hochdruck-Gasentladungslampen wird dieser Effekt genutzt. Über einen hohen Druck wird die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung der Atome erhöht, was zu einer starken Verringerung der Lebenszeit der angeregten Zustände führt und eben auch zu der damit einhergehenden energetischen Verbreiterung der Emission.

Kommt eine der verbleibenden Spitzen im eingestellten Bandpass des Monochromators zu liegen, führt das zu einer starken Asymmetrie des resultierenden Spektrums und kann daher nicht präzise durch eine Gaußverteilung angenähert werden. Aus diesen Überlegungen hat sich als die robusteste Methode die Schwerpunktbestimmung zur Ableitung der Wellenlängenachse erwiesen, da hier alle einzelnen Messwerte des Spektrometers herangezogen werden und daher, insbesondere auch im Falle asymmetrischer Spektren, genaue Ergebnisse erzielt werden. Der Schwerpunkt des Spektrums entspricht der dominanten

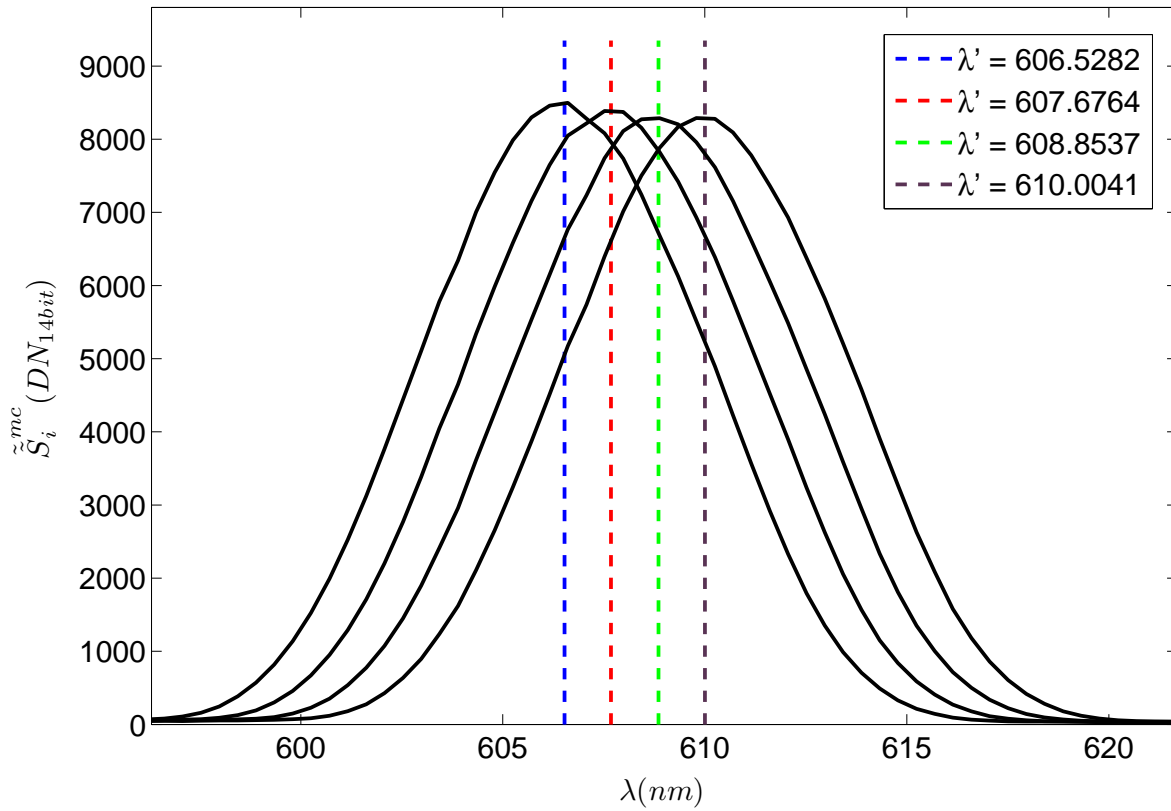


Abbildung 32: Dargestellt sind drei exemplarische Spektrometermessungen. Die effektive Wellenlängenachse λ' wurde aus den Schwerpunkten der einzelnen monochromatischen Spektren nach Gleichung 58 bestimmt, hier dargestellt als vertikale Linien. Die numerischen zugehörigen Werte sind in der Legende eingetragen. Im Falle symmetrischer Spektren fällt der Schwerpunkt mit der Lage des Maximums zusammen.

Wellenlänge, welche bei der Messung zum Kamerasignal beiträgt und stellt somit die beste Näherung der anregenden Wellenlänge dar:

$$\lambda'_i = \int_{\lambda} \lambda \cdot \tilde{S}_i^{mc}(\lambda) d\lambda \quad (58)$$

Mit den Begriffen der Statistik beschrieben, ist hier λ'_i der Erwartungswert der Variablen λ zur Verteilung $\tilde{S}_i^{mc}(\lambda)$. Liegt eine symmetrische Verteilung vor, insbesondere einer Normalverteilung, entspricht der Erwartungswert dem Mittelwert. Im Falle symmetrischer, gaußförmiger Spektren sind daher die Ergebnisse mit der Bestimmung durch Regression identisch. Durch das Einbeziehen aller einzelnen Messpunkte ist diese Herangehensweise sehr robust gegenüber Rauscheinflüssen. Exemplarische Ergebnisse sind in Abbildung 32 dargestellt.

Die 360 einzelnen Messpunkte erstrecken sich über den sichtbaren Spektralbereich von $\lambda'_1 = 376$ nm bis $\lambda'_{360} = 790$ nm, wobei das mittlere Inkrement bei $\overline{\Delta\lambda'} = 1.15$ nm liegt (siehe Abbildung 33 rechte Seite). Die bestimmte Wellenlängenachse und die Inkremente sind in Abbildung 33 dargestellt. Die mittlere Schrittweite auf der Wellenlängenachse ist etwa um einen Faktor zwei geringer, als die bestimmte Bandbreite der einzelnen Spektren, was zu einer hohen Abtastung des Signals führt. Hierdurch kann effektiv die statistische Unsicherheit der Messung, verursacht durch Systemrauschen, weiter reduziert werden.

Die starken Oszillationen der Wellenlängenachse sind auf die schmalbandigen spektralen Spitzen zurückzuführen, welche sich über die Einzelmessungen über den Bandpass des Monochromators hinweg verschieben und somit eine Verschiebung des Schwerpunktes gegenüber der Mitte des Bandpasses bewirken. Liegt die Spitze zu kleineren Wellenlängen hin verschoben, wird auch der Schwerpunkt des einzelnen Spektrums zu kleineren Wellenlängen verschoben. Das Inkrement zweier benachbarter Messungen $\Delta\lambda'$ wird somit reduziert. Ist die Spitze über die Mitte des Bandpasses hinweg gewandert, verschiebt sich der Schwerpunkt wiederum zu längeren Wellenlängen, was eine Vergrößerung des Inkrements der Wellenlängenachse nach sich zieht. Somit tritt beim Überwandern einer Spitze immer erst ein negativer, gefolgt von einem positivem Ausschlag auf (siehe Abbildung 33 rechts).

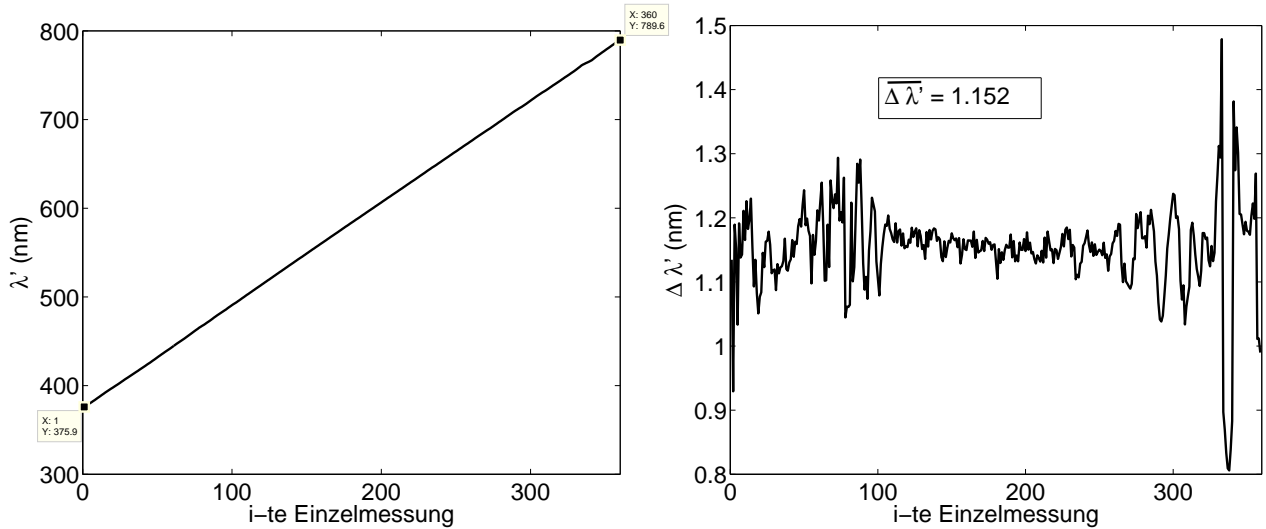


Abbildung 33: Links ist die aus der Messreihe resultierende Wellenlängenachse λ' über die 360 Einzelmesspunkte aufgetragen. Die Messreihe umfasst somit von der geringsten Wellenlänge $\lambda'_1 = 376$ nm bis $\lambda'_{360} = 790$ nm den sichtbaren Wellenlängenbereich. Rechts ist das jeweilige Inkrement $\Delta\lambda'$ über die gesamte Messung dargestellt. Das mittlere Inkremente beträgt $\overline{\Delta\lambda'} = 1.15$ nm.

Zu jeder Teilmessung wird neben der Messung des Spektrums ebenfalls ein Bild mit der multispektralen Zeilenkamera aufgenommen, aus welchem das aus dem Spektrum S_i^{mc} resultierende Signal der Kamera $K_k(\lambda'_i)$ bestimmt wird. Es wird in einem ersten Schritt die Position der punktuellen Beleuchtung bestimmt. Hierzu wird ein Messschritt herangezogen, bei welchem die Grünkanäle jeder der vier Teilkameras ein hinreichendes Signal zeigen. Dieser Fall tritt bei etwa $\lambda' = 575$ nm ein. Über alle 360 Einzelmessungen wird die Stabilität der Messposition kontrolliert, indem die Pixelnummer des Pixels mit dem maximalen Signal für jeden einzelnen Messschritt ausgewertet wird. Betrachtet wird, ob das Signalmaximum, gemessen als Pixelposition auf dem Sensor, über die Messung hinweg stabil ist. Diese Analyse hat zu der Erkenntnis geführt, dass eine direkte optische Abbildung des Austrittsspalts des Monochromators zu einer starken Instabilität in der Auswertung führt. Die Ursache dafür liegt darin, dass die spektrale Verteilung, welche über den Austrittsspalt gegeben ist, auf die weiße Referenzvorlage abgebildet wird. Daher wurde die experimentelle Lösung über den Gellichtleiter gewählt, wodurch die räumliche und spektrale Stabilität am Messpunkt sichergestellt werden kann.

Aus allen Messpunkten wird in einem festen Intervall im Bild um das Maximum des Signals gemittelt. Typischerweise kann das Signal über ± 3 Pixel als konstant angenommen werden. Um das Signal weiter zu stabilisieren wurde an jedem Messpunkt ein statisches Bild mit 500 Zeilen aufgenommen. Jeder einzelne Messwert entspricht somit einer Mittelung über $N = 500 \cdot 7 = 3500$ Einzelmessungen. Das entspricht einer Reduktion des Rauschens um einen Faktor von $\sqrt{3500} \approx 59$. Die Integrationszeit der

Kamera wurde so eingestellt, dass der Sensor bei maximalem Signal etwa zur Hälfte angesteuert ist, was in diesem Fall einem Signal zur Rauschabstand von $SNR_{max} = 160$ entspricht. Mit der zusätzlichen Mittelung wird ein maximales SNR von ca. 9440 erwartet. Daher ist davon auszugehen, dass die Messung nicht durch das Schrotrauschen der Kamera limitiert wird, systematische Fehler werden überwiegen.

Das aus dem kontrollierten Mittelungsprozess der Bilddaten gewonnene wellenlängenabhängige Signal $K_k(\lambda')$ ist in Abbildung 34 dargestellt. Aus den glatten Verläufen der Daten ist erkennbar, dass die Messung und die erarbeiteten Auswerteverfahren zu sehr robusten Ergebnissen führen. Systemrauschen ist hier nicht limitierend, qualitative Fehlerbetrachtungen werden sich daher ausschließlich auf systematische Abweichungen beschränken. Anhand dieser Daten lässt sich qualitativ die Auslegung der Filterfunktionen diskutieren. Ersichtlich ist, dass im blauen Spektralbereich alle steigenden Flanken zueinander verschoben sind. Wenn die einzelnen Kanäle an denselben Stellen im Spektrum steigende Flanken aufweisen, ist nicht zu erwarten, dass die Kanäle auf eine spektrale Änderung einer Farbprobe verschieden reagieren. Letzteres ist gleichbedeutend mit einer starken linearen Abhängigkeit der Kanäle untereinander. Daher wurde bei der empirischen Auswahl der Filter darauf geachtet, die steigenden Flanken der resultierenden Empfindlichkeiten sukzessive über die Wellenlänge zu verschieben.

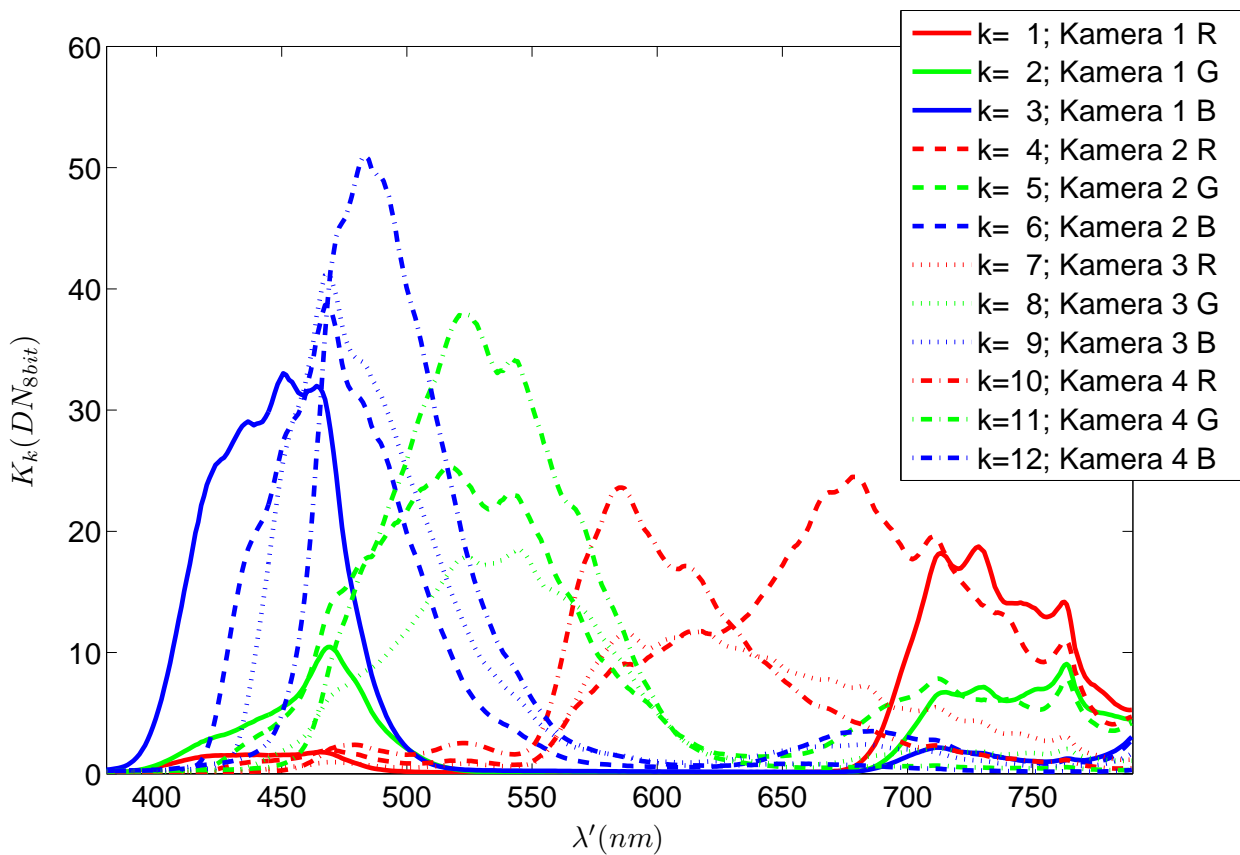


Abbildung 34: Aufgetragen sind die Messungen des wellenlängenabhängigen Kamerasignals $K_k(\lambda')$. Die vier Teilkameras entsprechen den einzelnen Linsen vor dem Zeilensensor (siehe Abbildung 14). Es wurde noch keine Normierung des Signals vorgenommen, die Werte entsprechen der unverarbeiteten Messungen extrahiert durch einfache Mittelung aus den Bilddaten.

Dasselbe gilt für die steigenden und fallenden Flanken der Filterfunktionen im mittleren und langwelligeren Spektralbereich. Die vier Filter wurden derart ausgewählt, um genau diese Verschiebungen der auftretenden Flanken zu erreichen, damit eine möglichst hohe Unabhängigkeit der Kanäle zueinander zu erreichen. Auf diesem Wege wird der von dem System erfassbare Farbraum maximiert. In anderen Worten ausgedrückt müssen die Kanäle derart ausgelegt werden, dass der spektrale Überlapp und somit

ebenfalls die lineare Abhängigkeit minimiert wird. Die wesentliche Einschränkung bei der Auslegung der Systemempfindlichkeiten der Kanäle besteht darin, dass allen zwölf Kanälen die Empfindlichkeiten der RGB-Kanäle zugrunde liegen. Daher ist es mit dieser Herangehensweise nicht möglich, die Kanäle so auszulegen, dass diese vollständig linear unabhängig sind. Eine Eigenwertanalyse zeigt, dass der wesentliche Informationsgehalt des Systems durch neun Basisvektoren aufgespannt wird. Anders formuliert könnten etwa neun linear unabhängige Kanäle denselben Informationsgehalt erfassen, wie das hier behandelte zwölf Kanalsystem. Aufgrund der intrinsischen linearen Abhängigkeit der Kanäle, verursacht durch die zugrunde liegenden RGB-Farbfiler, kann das System allerdings nicht auf die neun Kanäle reduziert werden.

An dieser Stelle folgt die weitere Auswertung, um aus den gemessenen Bilddaten und Spektren eine Größe mit absolutem Bezug zum Verhalten des Kamerasystems zu erhalten. Hierzu wird, wie vorher beschrieben ausgenutzt, dass die Empfindlichkeit des Spektrometers in der Messung der Einzelspektren sowie in der Messung des Beleuchtungsspektrums als Faktor enthalten ist (siehe Gleichung 57).

In Abbildung 35 ist auf der linken Seite das gemessene Beleuchtungsspektrum $\tilde{\tilde{S}}_b(\lambda')$ zu sehen, auf der rechten Seite die daraus resultierenden Systemempfindlichkeiten der zwölf einzelnen Kanäle $\Psi_k^s(\lambda')$. Mit dieser Systemempfindlichkeit kann nun das prinzipielle Verhalten des Systems untersucht werden, indem die Kamerasignale für einen definierten Datensatz von Farbproben in Form der gemessenen Reflexion $R_i(\lambda)$ nach Gleichung 21 berechnet und mit aus Bilddaten extrahierten, also gemessenen Werten verglichen werden.

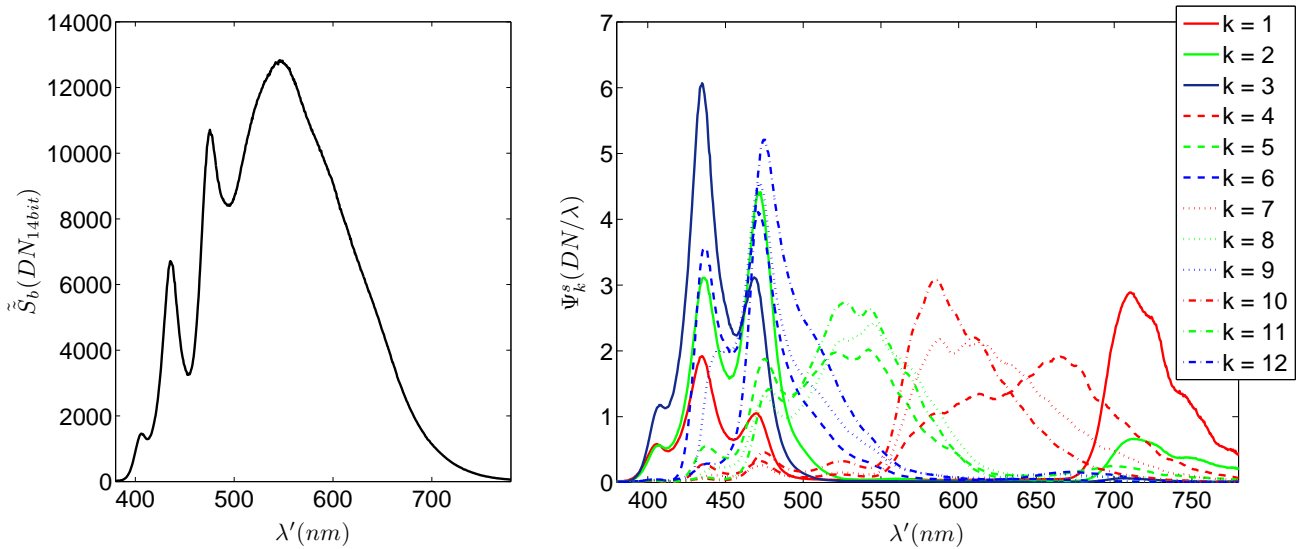


Abbildung 35: Links ist das gemessene Spektrum der LED-Zeilenbeleuchtung $\tilde{\tilde{S}}_b(\lambda')$ dargestellt. Rechts die effektive resultierende Empfindlichkeit des Kamerasystems $\Psi_k^s(\lambda')$, welche das Spektrum der LED-Zeilenbeleuchtung beinhaltet.

Als letzter korrigierender Schritt wurden einige Farbproben mit der Kamera aufgenommen und auf Basis der gemessenen Systemempfindlichkeiten die korrespondierenden Signalwerte berechnet. Da die Fläche unter der jeweiligen Empfindlichkeit dem Signal auf einem perfekten Weiß entspricht, können wir anhand der Farbproben die einzelnen Amplituden der Empfindlichkeiten mit einem kanalspezifischem Normierungsfaktor korrigieren. Dieser rechnerische Schritt entspricht in der Praxis der Herangehensweise, dass nach der korrekten Einstellung der Integrationszeit und der Verstärkungswerte der Kamera, jeder einzelne Kanal pixelweise auf einen Weißwert normiert wird. Hierbei werden Inhomogenitäten der Beleuchtung und der Randabfall, bzw. die Vignettierung der abbildenden Optik korrigiert. Um für den rechnerischen Abgleich einen möglichst großen Datensatz mit einzubeziehen, wurden die berechneten Kamersignale $K_{k,i}^\Psi$ über die gemessenen Kamerasignale $K_{k,i}^M$ aufgetragen und eine lineare Regression

durchgeführt. Die Steigung entspricht direkt dem Kehrwert des jeweiligen Normierungsfaktors, der die Konsistenz zwischen den Amplituden der gemessenen und der berechneten Kamerasignale herstellt. Wichtig ist hierbei, dass die spektrale Form der Empfindlichkeiten nicht verändert werden, sondern nur deren Flächeninhalt. Dieser Abgleich muss wie beschrieben empirisch vorgenommen werden, da die Verstärkungswerte und die Integrationszeit zwischen der Vermessung der spektralen Empfindlichkeiten und der Bildaufnahme der Farbproben geändert werden muss. Bei der Vermessung der spektralen Empfindlichkeiten wird nur ein schmalbandiges, näherungsweise monochromatisches Spektrum auf das Objekt gebracht. Die geringe Bandbreite limitiert, wie zuvor diskutiert, die Bestrahlungsstärke. Daher muss in dieser Messung die Integrationszeit auf ca. $500\mu\text{s}$ eingestellt werden. Beim Erfassen der Farbproben kann mit der minimalen Integrationszeit der multispektralen Zeilenkamera von $50\mu\text{s}$ der Sensor voll angesteuert werden. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass mit der Kamera ein Weißabgleich auf einem weißen Farbstreifen durchgeführt wird, der naturgemäß eine Reflexion von $R(\lambda) < 1$ aufweist. Um zwischen diesem materialspezifischen Weißpunkt und den spektralen Systemempfindlichkeiten einen absoluten Bezug herstellen zu können, ist daher der beschriebene Abgleich notwendig.

5.2 Konsistenztest der gemessenen spektralen Empfindlichkeiten und der Kalibrierung

Zur Kalibrierung werden Referenzfarben verwendet (siehe Abbildung 40), welche mit einem Referenzspektrometer (*Konica Minolta FD7*) unter der Messbedingung M2 (ohne UV-Anregung) und der Messgeometrie $45^\circ_a : 0^\circ$ vermessen wurden. Um eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse sicherzustellen, wurden die Daten mit dem automatisierten System *ColorScoutA+* der Firma *ColorPartner GmbH* vermessen. Somit kann garantiert werden, dass bei einer wiederholten Messung dieselben Positionen angefahren werden. Des Weiteren wird durch das System automatisch nach einer festen Anzahl von Messungen eine erneute Weißreferenz durchgeführt. Somit kann garantiert werden, dass über die gesamte Messdauer von ca. 30 min keine Beeinflussung der Messdaten durch thermische Einflüsse auftreten. Zur Herstellung der Farbproben wird ein Inkjetdrucker eingesetzt, der einen möglichst großen Farbraum abdeckt. Der Drucker (*HP Designjet*) verfügt nicht nur über die gewöhnlichen Prozessfarben Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz, sondern bietet auch noch die zusätzlichen Grundfarben grün, rot und blau. Durch die größere Anzahl der Basiskomponenten wird der Farbraum des Druckers laut Hersteller auf die Sonderfarben des Pantone-Farbsystems erweitert. Der Drucker verfügt über ein integriertes Spektrometer, welches eingesetzt wird, um zyklisch das Farbprofil des Druckers neu zu bestimmen. Dadurch kann eine hohe gleichbleibende Stabilität der gedruckten Farbproben gewährleistet werden. Zur Bestimmung des maximalen Farbraums des Druckers wurden Farben mit maximaler Sättigung definiert und ausgedruckt. Die Einstellungen des Druckers wurden so gewählt, dass Farbproben, welche außerhalb des Gamuts des Druckers liegen, auf dessen Hülle projiziert werden. Auf diesem Weg konnte die Hülle des Gamuts des Druckers ermittelt werden. Anschließend wurde der umfasste Farbraum im CIE- $L^*a^*b^*$ Farbraum gleichabständig aufgespannt.

Im folgenden Abschnitt wollen wir nun die Konsistenz der gemessenen Systemempfindlichkeiten Ψ_k^s untersuchen, indem wir die Voraussage der Daten nach Gleichung 21 testen. Hierzu wurde ein Referenzbeleg aufgenommen und die resultierenden gemessenen Kamerasignale $K_{k,i}^M$ durch Mittelwertbildung extrahiert. Die theoretischen Kamerasignale $K_{k,i}^\Psi$, welche nach dem Modell zu erwarten sind, wurden unter Verwendung der gemessenen Reflexionsspektren der Druckproben $R_i(\lambda')$ und der gemessenen spektralen Systemempfindlichkeit $\Psi_k^s(\lambda')$ nach Gleichung 21 berechnet.

Zur einfacheren Visualisierung wurden die Daten für jeden Kanal und für jede Farbprobe übereinander aufgetragen. Im idealen Fall, wenn also die berechneten mit den gemessenen Kamerasignalen identisch sind, würde sich für jeden Kanal eine Gerade mit der Steigung 1 ergeben. Die Ergebnisse sind in Grafik 36 zu sehen. Oben links sind die nach Gleichung 21 abgeleiteten Kamerasignale über die Messungen aufgetragen. Wobei ersichtlich ist, dass das lineare Modell das multispektrale Kamerasystem gut beschreiben kann. Allerdings sind auch eindeutige, nicht zu vernachlässigende Abweichungen ersichtlich, welche im Weiteren diskutiert werden. Um die absoluten Abweichungen besser darstellen zu können, wurde

im unteren Grafen der Abbildung 36 die Differenz der beiden Datensätze über die jeweilige Messung aufgetragen.

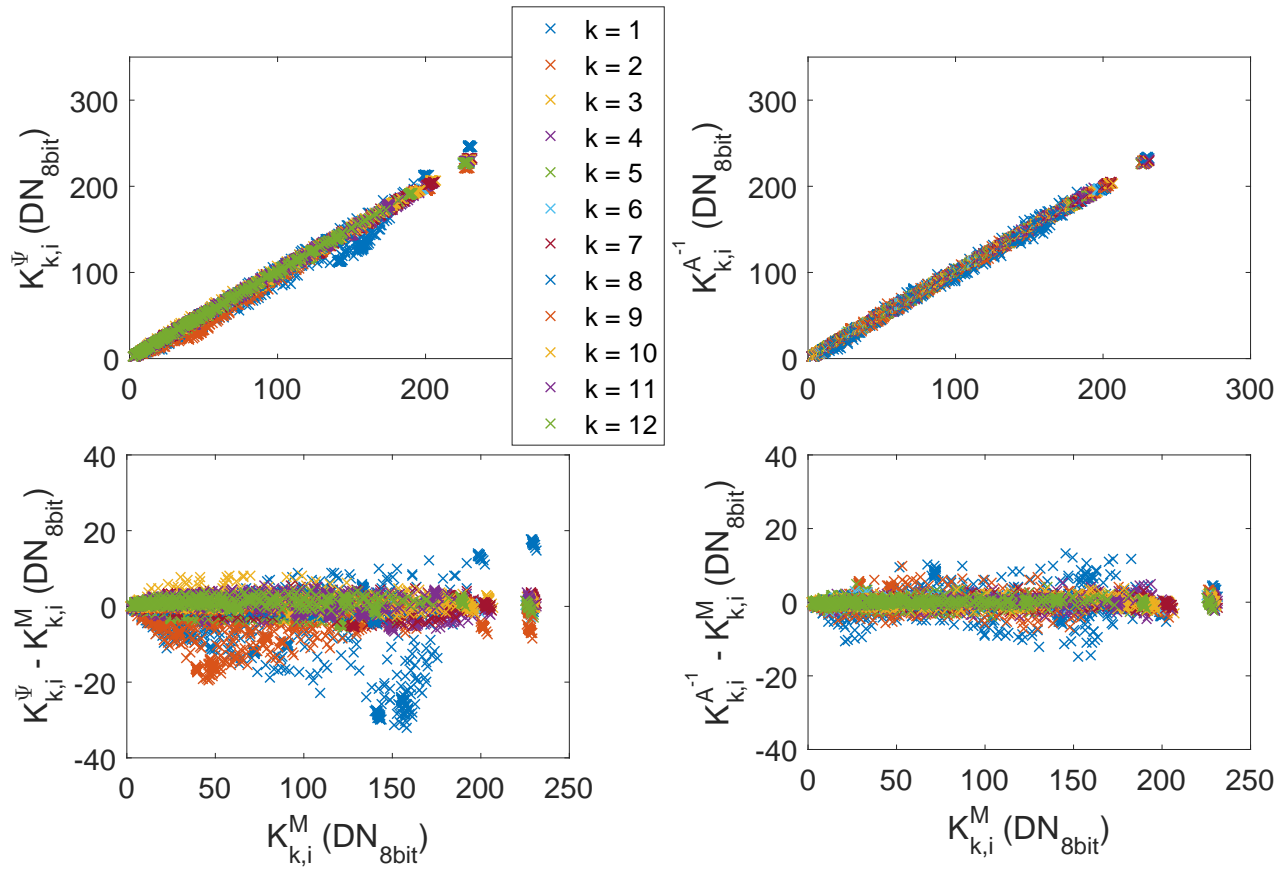


Abbildung 36: Auf der linken Seite werden die gemessenen $K_{k,i}^M$ mit den aus dem Modell berechneten Kamerasignalen $K_{k,i}^\Psi$ verglichen. Auf der rechten Seite werden die gemessenen Kamerasignale gegen die aus der inversen Kalibrierung erwarteten Signale $K_{k,i}^{A^{-1}}$ aufgetragen. In den unteren Grafen wird die Differenz zwischen den Modelldaten und den gemessenen Kamerasignalen gezeigt, hier sind die auftretenden Abweichungen eindeutiger ersichtlicher. Die grundlegende Konsistenz des Modells kann gezeigt werden, wobei die empirische Betrachtung der inversen Kalibrierung deutlich geringere Abweichungen aufweist.

Auf der rechten Seite von Abbildung 36 werden ebenfalls berechnete Kamerasignale über die gemessenen Kamerasignale aufgetragen, wobei hier ein anderer Ansatz zur Berechnung der Kamerasignale eingesetzt wird. Im ersten Schritt werden auf Basis der Beziehung 27 die Einträge der Matrix A bestimmt, was uns anschließend nach Gleichung 23 ermöglicht, aus einem Satz von Kamerasignalen \vec{K} das korrespondierende Reflexionsspektrum der Probe \vec{R} zu rekonstruieren. In einem zweiten Schritt wird mittels der *Moore Penrose Pseudoinversen* die inverse Kalibriermatrix A^{-1} bestimmt, welche es uns wiederum nach Gleichung 24 ermöglicht, aus bekannten Reflexionsspektren die zu erwartenden Kamerasignale $K_{k,i}^{A^{-1}}$ zu berechnen. Es wurde somit ein alternativer Ansatz zur Anwendung des Modells 21 entwickelt, der es uns insbesondere ermöglicht, die Konsistenz der empirischen Kalibrierung, welche der Matrix A entspricht, zu überprüfen und diese somit hinsichtlich prinzipbedingten Abweichungen zu untersuchen.

Die Ergebnisse sind auf der rechten Seite von Abbildung 36 dargestellt. Oben sind die berechneten Kamerasignale $K_{k,i}^{A^{-1}}$ über die gemessenen Kamerasignale $K_{k,i}^M$ aufgetragen. Unten ist die Differenz der beiden korrespondierenden Datensätze zu sehen. Im Vergleich fällt auf, dass die inverse Kalibrierung A^{-1}

die gemessenen Kamerasignale besser beschreibt. Diese Tatsache mag im ersten Moment nicht intuitiv erscheinen, kann aber qualitativ wie folgt begründet werden:

Zur Bestimmung der spektralen Systemempfindlichkeiten $\Psi_k^s(\lambda')$ sind mehrere hundert Einzelmessungen notwendig, welche eine gesamte Messzeit von ca. 60 min benötigen. Durch die relativ hohe gesamte Messzeit ist zu erwarten, dass die Messung mit thermischen Schwankungen behaftet ist. Es wurde bei der Messung sichergestellt, dass alle Komponenten, wie die Xenon Hochdrucklampe, die Kamera, das Spektrometer und die LED-Lichtquelle, jeweils ca. eine Stunde vor der Aufnahme der Messdaten eingeschaltet wurden. Jedoch muss aufgrund des hohen thermischen Eintrags der einzelnen Komponenten mit temperaturbedingten Änderungen gerechnet werden.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist durch den Einsatz von zwei Spektrometern (eines als Referenzgerät zur Bestimmung der Empfindlichkeiten, das zweite zur Erfassung der Reflexion der Farbproben) gegeben, welche prinzipiell eine leicht verschiedene Wellenlängenkalibrierung aufweisen können [Rich und Martin, 1999]. Bei der Vermessung der Systemempfindlichkeiten wird ein spektral hochauflösendes fasergekoppeltes Spektrometer eingesetzt. Die Farbproben wurden mit einem konventionellen, spektrometerbasierten Farbmessgerät erfasst, welches wie gewöhnlich Stützstellen mit einem Abstand von 10 nm ausgibt. Sollten zwischen diesen beiden Geräten auch nur leichte Wellenlängenverschiebungen auftreten, kann das zu erheblichen Abweichungen im oben aufgeführten Vergleich der Messdaten führen. Bei der Anwendung der invertierten Kalibrierung A^{-1} kommen außer dem spektrometerbasierten Farbmessgerät und der Kamera selber keine weiteren Messgeräte zum Einsatz. Die Einfachheit dieses Ansatzes muss auch als dessen Stärke betrachtet werden. Jede komplexe Messung, bei welcher eine Vielzahl von Geräten und Einzelmessungen eingesetzt werden, bringt eine größere Messunsicherheit mit sich.

Auffällig ist, dass der erste Kamerakanal die höchsten absoluten Abweichungen aufweist. Es wurden hier eine Vielzahl an Überlegungen und Optimierungsmöglichkeiten betrachtet, um die hier auftretenden höheren Abweichungen zu verstehen, bzw. um diese zu reduzieren. In Abbildung 34 sind die Messdaten der einzelnen Kanäle dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass der Kanal 1 einen wesentlichen Signalbeitrag bei Wellenlängen über 700 nm erfährt. In Grafik 31 ist ersichtlich, dass oberhalb von 700 nm das Signal des Spektrometers sehr gering ausfällt, was zu weiteren Messunsicherheiten führen kann. In dem Normierungsschritt (Gleichung 57) kann somit eine Messunsicherheit des Spektrometers verstärkt werden, da durch einen kleinen Messwert dividiert wird. Untersuchungen haben offenbart, dass das Schwarzsinal des Spektrometers gewisse zeitliche Instabilitäten zeigt, die insbesondere Messfehler bei geringem Signal verursachen können. Zusätzlich berücksichtigt die empirische Anpassung der Koeffizienten der Kalibriermatrix A auf Basis der Referenzfarbdatensatzes die Eigenschaften des Messsystems entlang der Kamerazeile. Wohingegen die Messung der spektralen Empfindlichkeiten mit dem hier entwickelten System nur an einem Punkt des Sensors vorgenommen werden kann. Eine vollständige Charakterisierung der Sensorzeile könnte durch etwa 100 Einzelmessungen erfolgen. Diese ausführliche Messung würde zu einer gesamten Messzeit von 200 Stunden führen und somit nach einer weitgehenden Automatisierung des Messverfahren verlangen.

Aus den hier erhaltenen Ergebnissen lassen sich nun zwei Schlussfolgerungen ableiten. Das Kameramodell nach Beziehung 21 im Zusammenspiel mit den Messungen der Systemempfindlichkeiten $\Psi_k^s(\lambda')$ kann in guter Näherung zu Simulation des multispektralen Kamerasystems herangezogen werden.

Kamerasignale $K_{k,i}$ können in guter Näherung unter Verwendung der Messdaten der Systemempfindlichkeiten $\Psi_k^s(\lambda')$ und dem linearen Modell nach Beziehung 21 berechnet werden, wenn die Reflexion der betrachteten Probe $R_i(\lambda)$ bekannt ist. Insbesondere grundlegende Analysen, wie die Betrachtung der Metamere des Messsystems, können durchgeführt werden. Hingegen für eine absolute Kalibrierung des Messsystems im Sinne einer Farbmessung sind die erzielten Genauigkeiten durch die Messung der spektralen Systemempfindlichkeiten nicht hinreichend. Es wird mit der empirischen Anpassung an einen Referenzfarbdatensatz eine bessere Beschreibung des Messsystems und somit eine robustere Kalibrierung erzielt.

5.3 Universalität der empirischen Kalibrierung

Ein wesentlicher Punkt liegt in der Übertragbarkeit der Kalibriermatrix \mathbf{A} zwischen unterschiedlichen Farbräumen. Da die Kalibrierung zur Berechnung, bzw. zur Rekonstruktion der Reflexionsspektren auf einem spezifischen Farbraum der Proben \vec{R}_i berechnet wird, bedeutet das auch, dass der Koeffizientensatz der Kalibriermatrix \mathbf{A} für diesen speziellen Referenzfarbdatensatz optimiert ist. Im Bereich des Rasterdrucks (Inkjet, Offset) kann in erster Näherung das resultierende Reflexionsspektrum eines gedruckten Farbfeldes als Linearkombination der Grundfarben unter Berücksichtigung der jeweiligen Flächendeckung voraus gesagt werden. Die Grundlagen wurden von Neugebauer [1937] entwickelt und durch folgende Arbeiten weiter verfeinert, um zum Beispiel die optische Druckpunktvergrößerung mit zu berücksichtigen [Rolleston und Balasubramanian, 1993] (und enthaltene Referenzen). Da die Grundfarben verschiedener Druckprozesse und auch im selben Prozess die Grundfarben unterschiedlicher Hersteller nicht dieselbe spektrale Reflexion zeigen, muss hier betrachtet werden, wie sich die Übertragung der Kalibrierung auf einen anderen Datensatz verhält.

Exemplarisch wird hier die Übertragbarkeit der Kalibrierung \mathbf{A} anhand von zwei Farbdatensätzen überprüft. Einer wurde im Inkjet-, der andere im Offset-Druckverfahren hergestellt. Verglichen wurde der im Inkjet-Druckverfahren hergestellte Farbprobensatz (siehe Abbildung 40) mit einem Pantone-Farbprobensatz. Der Pantone-Farbprobensatz wurde aus einem Farbfächer des Pantone-Farbsystems hergestellt (*FORMULA GUIDE Solid Uncoated*). Beide Belege wurden mit demselben Referenzspektrometer und mit der multispektralen Zeilenkamera vermessen. Der Farbumfang der beiden Farbdatensätze im CIE-L*a*b*-Raum ist in Abbildung 37 dargestellt.

Die erreichbare Farbsättigung des Inkjet-Drucks ist prinzipiell in diesem Beispiel höher als im Falle des Pantone-Datensatzes, da die Farben auf dem Inkjet Drucker auf Fotopapier gedruckt wurden. Im Falle der Pantone-Farben handelt es sich um ungestrichenes Papier, welches generell eine geringere Farbsättigung ermöglicht. Im Falle ungestrichener Papiere dringt die Farbe tiefer in das Substrat ein, was zu einer geringeren maximal realisierbaren Druckdichte und somit zu einer geringeren resultierenden Farbsättigung bei gleichem Farbauftrag führt.

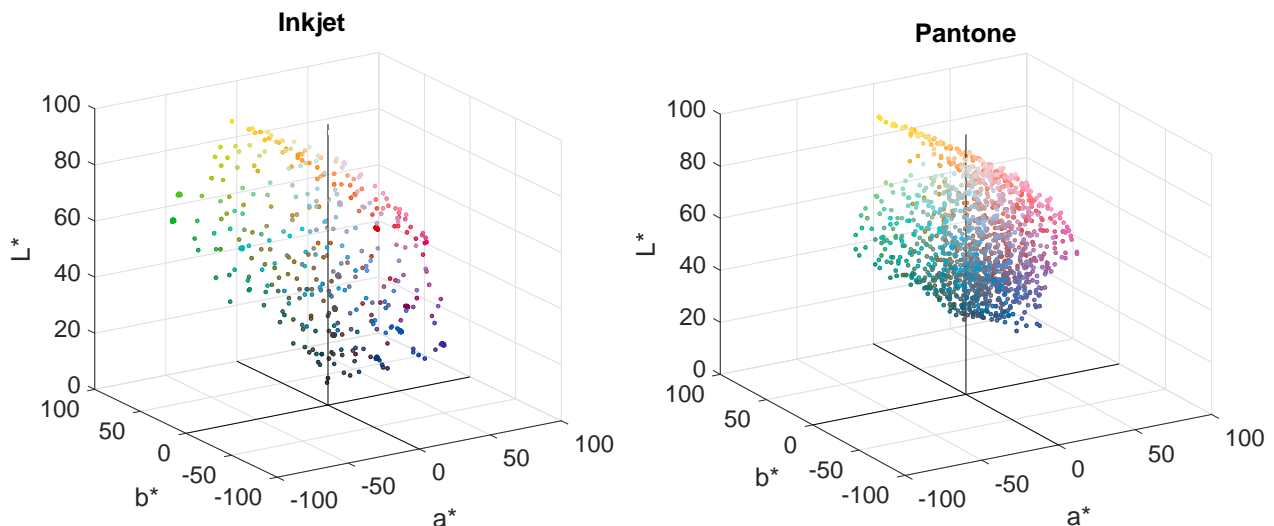


Abbildung 37: Auf der linken Seite sind die Farben des Inkjet Referenzbelegs im CIE-L*a*b* Farbraum dargestellt. Auf der rechten Seite ist der Farbumfang des Pantone Datensatzes zu sehen.

Zum weiteren qualitativen Vergleich der beiden Farbräume wurde anhand der Singulärwertzerlegung beider Datensätze verglichen, wie viele Eigenvektoren $V_{R,i}$ mit welchen Singulärwerten $\Lambda_{R,i}$ den jeweiligen Funktionenraum der Reflexionen $R_i(\lambda)$ aufspannen. In Abbildung 38 sind die Ergebnisse dargestellt.

Die oberen Grafen zeigen die Eigenvektoren. Unten sind die zugehörigen Singulärwerte aufgetragen. Auf der linken Seite wurde der Datensatz der im Inkjet hergestellten Farben betrachtet, auf der rechten Seite der im Offset hergestellte Pantone-Farbdatsatz. Die Singularwerte zeigen ein vergleichbares Abfallen der Beiträge, was auf eine vergleichbare effektive Anzahl von Basisvektoren schließen lässt. Bis zum vierten Eigenvektor sind die beiden Datensätze qualitativ vergleichbar, jedoch zeigt der fünfte eindeutige Differenzen. Aufgrund dieser Aussagen soll lediglich abgeleitet werden, dass die Dimensionalität, also die notwendige Anzahl von Basisvektoren, zur Beschreibung des jeweiligen Datensatzes gut vergleichbar ist. Jedoch unterscheiden sich die Datensätze wesentlich.

Auf beiden Datensätzen wurde die Koeffizientenmatrix A , also die Kalibrierung der multispektralen Kamera berechnet und zur Überprüfung der Ergebnisse auf denselben und den anderen Datensatz angewendet. Durch diesen Kreuztest wird die Übertragbarkeit der Kalibrierung geprüft. Die in den vier Fällen erhaltenen rekonstruierten Spektren wurden farbmessmetrisch hinsichtlich der resultierenden Abweichungen relativ zur Referenzmessung mit dem Spektrometer verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 39 dargestellt.

Hier werden über den jeweiligen vollständigen Datensatz die Farbfehler sortiert aufgetragen. In der Legende sind die maximalen $\Delta E_{76_{max}}$ und die mittleren Farbfehler $\overline{\Delta E_{76}}$ eingetragen. Es ist zu erkennen, dass die farbmessmetrischen Abweichungen bei der Anwendung auf den Datensatz, auf welchem auch die Kalibrierung berechnet wurde, geringer ausfallen als im Falle der Übertragung. Der maximale und der mittlere Fehler spiegeln Letzteres eindrücklich wider. Die Grafen der sortierten Farbabweichungen zeigen das Verhalten durch ein schnelleres Abklingen hin zu geringeren Abweichungen.

Hierbei muss bedacht werden, dass nach der Analyse der Eigenwertzerlegung die Dimensionalität beider Farbdatsätze sehr gut vergleichbar ist, in Abbildung 38 (Grafiken unten) klingen die Beiträge gemessen in der Amplitude der Eigenwerte etwa gleichförmig ab. Hingegen die Eigenvektoren zeigen für die ersten vier Komponenten ein leicht unterschiedliches Verhalten, ab dem fünften Basisvektor sind drastische Unterschiede ersichtlich. Die Ursache für den Unterschied liegt in den verschiedenen Basisfarben, aus welchen der jeweilige Farbraum aufgespannt wird. Aus dieser Betrachtung leiten wir ab, dass eine generelle Übertragbarkeit der Kalibrierung auf ähnliche Farb Räume möglich ist. Jedoch muss für eine möglichst präzise Kalibrierung, welche durch eine möglichst geringe farbmessmetrische Abweichung zwischen den gemessenen Spektrometerreferenzdaten und den aus den Kamerasignalen rekonstruierten Reflexionsspektren definiert ist, eine applikationsspezifische Kalibrierung vorgenommen werden. In der Arbeit von Godau u. a. [2013] zeigt sich, dass selbst bei der Übertragung der Kalibrierung innerhalb eines Druckverfahrens Limitierungen bestehen. Im Vergleich zweier Farbdatsätze, welche beide im Offsetverfahren in unterschiedlichen Druckereien hergestellt wurden, zeigt sich, dass diese nicht dieselben farbmessmetrischen Resultate bei der Bewertung der Übertragbarkeit der Farbkalibrierung der multispektralen Zeilenkamera zeigen.

Das hier präsentierte Beispiel wurde gewählt, um herauszuarbeiten, dass selbst bei sehr ähnlichen Farb Räumen Abweichungen bei einer Übertragung der Farbkalibrierung der multispektralen Zeilenkamera zu erwarten sind. Deutlicher fallen die Unterschiede aus, wenn nicht verwandte Färbungsprozesse miteinander verglichen werden. Es hat sich gezeigt, dass beispielsweise Reflexionsspektren, welche in einem Druckprozess erzeugt werden, stark verschieden sind im Vergleich zu einer photochemisch entwickelten Fotografie. In diesem Falle zeigt sich, dass die Farbkalibrierung A zwischen diesen beiden Farbdatsätzen nicht sinnvoll übertragen werden kann. In vielen Applikationen kann es allerdings praktisch schwierig sein, einen Referenzbeleg mit einer hinreichenden Anzahl verschiedener Farbproben herzustellen. Daher bietet sich in solchen Fällen insbesondere der Digitaldruck an, um die notwendigen Referenzbelege, welche für die empirische Kalibrierung des Systems gebraucht werden, zu erstellen. Es muss allerdings durch eine Untersuchung die Übertragbarkeit der Kalibrierung auf den Farbraum der Applikation exemplarisch überprüft werden. Zumindest für diesen Schritt ist es notwendig, einige Farbproben zur Verfügung zu haben, welche direkt in dem Prozess, in welchem die multispektrale Zeilenkamera als Farbmessgerät eingesetzt werden soll, hergestellt wurden. Die Kalibrierung, wie sie hier vorgestellt wurde, kann etwa ab einer Anzahl von 40 Farbproben robust berechnet werden, wobei die ausgewählten

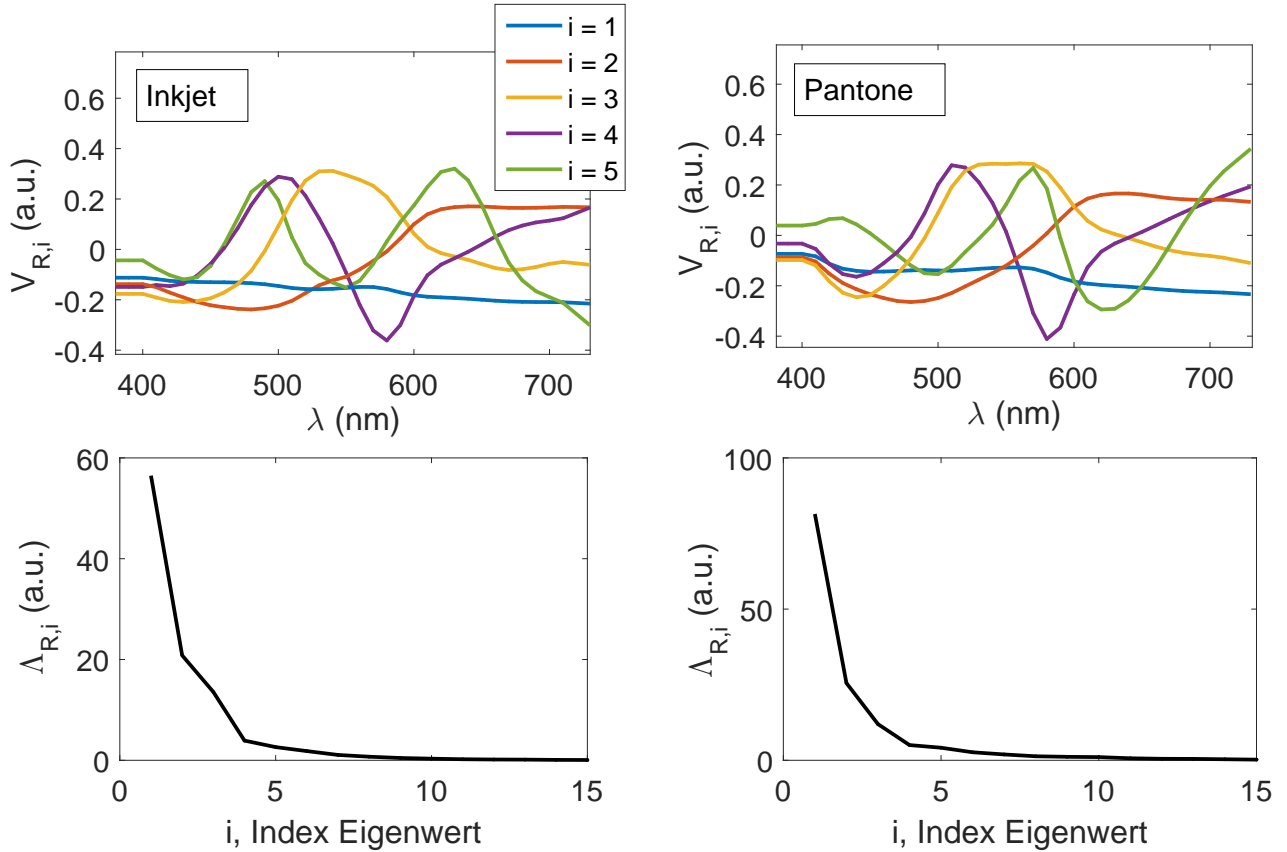


Abbildung 38: Zu sehen sind oben die ersten fünf Eigenvektoren $V_{R,i}(\lambda)$ der eingesetzten Farbdatenätze (links Inkjet, rechts Pantone), welche durch Eigenwertzerlegung erhalten wurden. Unten sind die korrespondierenden, entsprechend der fallenden Varianz fallenden Eigenwerte $\Delta_{R,i}$ aufgetragen. Ab dem fünften Eigenvektor zeigen sich deutliche Unterschiede im funktionalen Verlauf der Eigenvektoren.

Farben möglichst gleichabständig über den Farbraum der Applikation verteilt sein sollten. Die empirische Kalibrierung eignet sich nur sehr bedingt für eine Extrapolation aus dem Farbraum heraus, der zur Kalibrierung eingesetzt wurde. Eine Interpolation hingegen funktioniert sehr robust. Damit ist gemeint, dass eine zu messende Farbe nicht in dem Referenzfarbdatenatz der Kalibrierung enthalten sein muss, es sollten sich allerdings Proben in der näheren Umgebung (im Farbraum) befinden, welche somit der Kalibrierung als Interpolationsstützpunkte dienen können.

5.4 Einfluss von Systemrauschen und Inhomogenität der Messfelder

Wird ein ROI (*Region of Interest*) betrachtet, auf welchem ein Farbmesswert ermittelt werden soll, so dominieren zwei Faktoren die erreichbare Wiederholgenauigkeit der Messung. Einerseits das Signalrauschen jedes einzelnen Pixels, welches wie diskutiert (siehe Kapitel 2.1) im Wesentlichen durch Schrottrauschen der Photonenabsorption dominiert wird. Dieses Rauschen der Bilddaten überträgt sich über das lineare Rekonstruktionsverfahren direkt auf das Rauschen der Farbmessung.

Der zweite Einfluss ist durch die Inhomogenität der Objektoberfläche gegeben. Jede makroskopisch homogene Farbfläche ist bei genauer, mikroskopischer Betrachtung mehr oder weniger inhomogen. Daher ist es äußerst wichtig die Größe des Messfeldes so zu definieren, sodass die Inhomogenität der Farbprobe durch die Mittelung über alle Pixel des ROI hinreichend kompensiert wird. Zusätzlich bewirkt der Einsatz eines größeren ROIs auch eine Mittelung über lokale farbliche Variationen. Diese Mittelung

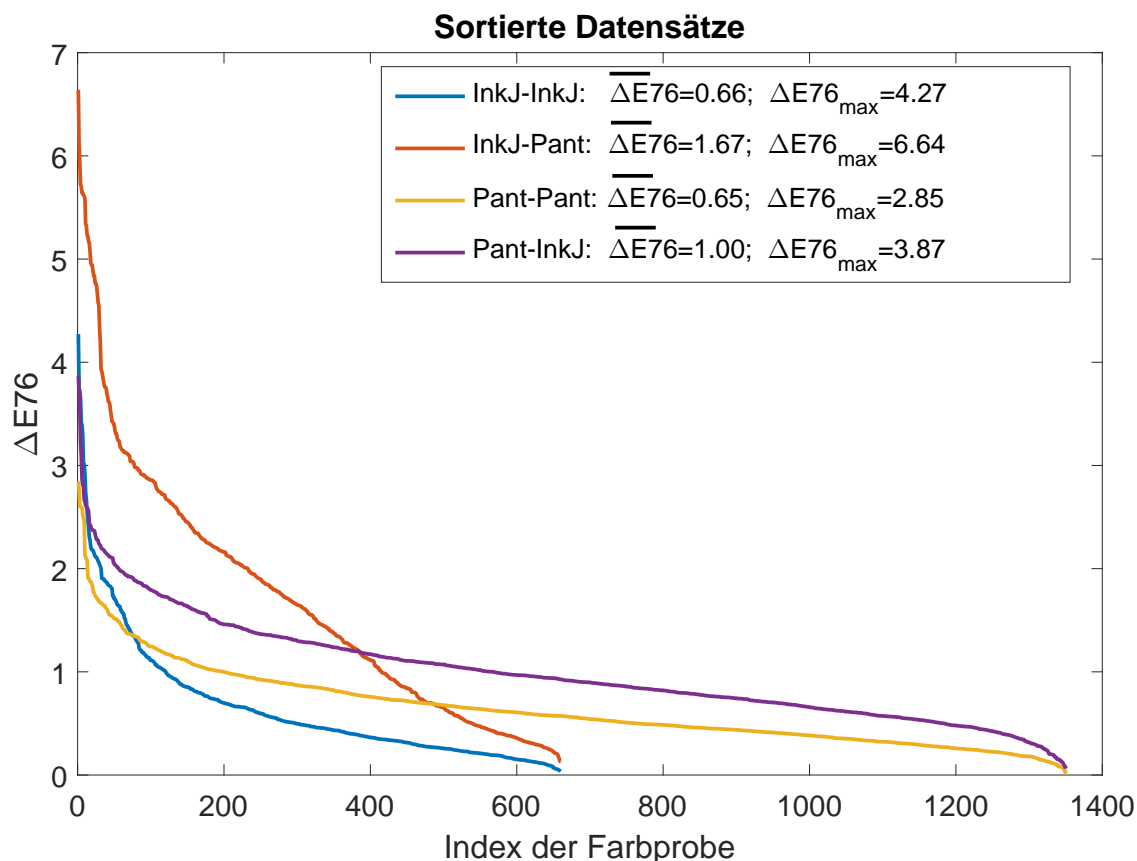


Abbildung 39: Aufgetragen sind die sortierten farbmetrischen Abweichungen $\Delta E76$ Werte für vier Fälle des Übertragbarkeitstests der Kalibrierung. Es wurde die auf Basis der Inkjet Farbproben bestimmte Kalibrierung auf denselben Datensatz angewendet. Im zweiten Fall wurde die Kalibrierung auf dem Pantone Datensatz berechnet und auf die Inkjet Proben zur Rekonstruktion der Spektren angewendet. Der dritte und vierte Datensatz sind analog zu verstehen. In der Legende sind die jeweiligen mittleren $\overline{\Delta E76}$ und maximalen resultierenden Farbfehler $\Delta E76_{\max}$ eingetragen. Es ist eindeutig ersichtlich, dass die Kalibrierung auf dem Farbraum, auf welchen diese berechnet wurde, mit höherer Genauigkeit angewendet werden kann.

über den Probenort ist notwendig, um bei einer wiederholten Positionierung des ROIs, welche gewöhnlich zu einer minimalen Abweichung der Lage des Messfeldes führt, hinreichend reproduzierbare Werte zu erhalten. Die Abhängigkeit der Messung vom Messort ist nicht spezifisch durch den Einsatz eines Kamerasystems gegeben. Die Mindestgröße der Messfläche wird allgemein und insbesondere für die Farbmessung auf gedruckten Proben durch die Norm ISO13655 [2009] definiert. Hierbei ist zu beachten, dass in jeglichem Rasterdruckverfahren intrinsisch durch die endliche Rasterpunktgröße eine starke mikroskopische Inhomogenität vorhanden ist. Es wird durch die Norm empfohlen, das Messfeld so zu wählen, sodass mindestens 79 Rasterpunkte in der Messfläche enthalten sind, wenn möglich werden 177 empfohlen. Bei typischen Rasterfrequenzen von 150 – 200 lpi (lines per inch) ergeben sich somit als kleinster Messfelddurchmesser 1.3 – 1.7 mm.

Neben den Einflüssen durch das Systemrauschen und den Inhomogenitäten der Proben gilt es die örtlichen optischen Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Die meisten Substrate, und somit auch die gedruckten Farbproben, sind nicht vollständig opak. Daher findet eine laterale optische Wechselwirkung benachbarter Farbfelder durch Lichtstreuung innerhalb des bedruckten Substrates statt. Diesem Effekt kann messtechnisch begegnet werden, indem entweder sehr viel großflächiger beleuchtet als gemessen

wird (*'over filling'*). Oder umgekehrt, wenn das Messfeld größer als die ausgeleuchtete Fläche ist (*'under filling'*). In beiden Fällen darf allerdings die größere Fläche nicht in benachbarte Farbfelder hinein reichen, da in diesem Fall die Messung stark verfälscht werden würde. Bei dem zeilenkamerabasierten Ansatz besteht nur die Möglichkeit, das Objekt sehr viel breiter auszuleuchten als es vermessen wird, da die optische Messfläche durch die Dimension der Abbildung der Pixel auf das Objekt gegeben ist ($\approx 0.1 - 0.5$ mm). Ausgeleuchtet wird daher über einen Streifen mit einer Breite von $\approx 20 - 25$ mm.

Durch eine endliche MTF der abbildenden Optik und des Sensors ergeben sich Wechselwirkungen benachbarter Messfelder, welche hier auch betrachtet werden müssen. Um den vielseitigen Sachverhalt messtechnisch zu analysieren, wurden zwei Bilddatensätze herangezogen, welche von demselben Referenzbeleg (siehe Abbildung 40) aufgenommen wurden. In dem ersten Fall wurde bei einer geringen Transportgeschwindigkeit das Objekt mit einem Faktor 60 überabgetastet. Dies ermöglicht, durch Mittelung das zeitliche Rauschen um einen Faktor 7.7 zu verringern. Der verwendete Referenzbeleg umfasst 660 Farbproben, welche gleichabständig (gemessen in ΔE_{76}) den Farbraum des eingesetzten Digitaldruckers (HP Designjet) abdecken.



Abbildung 40: Zu sehen ist der im Inkjet Druckverfahren hergestellte Referenzbeleg, der 660 Farbproben enthält. Auf der linken Seite sind exemplarisch kleine ROIs (relative Kantenlänge $l_{rel} = 10\%$) überlagert dargestellt, auf der rechten Seite größere mit einer Kantenlänge von $l_{rel} = 70\%$. Durch Mittelung im Bild über die variiierenden ROIs hinweg werden aus dem Referenzbeleg Kamerasignale extrahiert.

Die Farbproben weisen eine Kantenlänge von $l_{pr} = 12$ mm auf, wodurch sichergestellt werden kann, dass die mit einem Spektrometer (*Konica Minolta FD7*) gemessenen Referenzdaten frei von Unsicherheiten durch die Positionierung sind. Laterale optische Kopplungen können durch die gewählte Messfeldgröße ebenfalls vermieden werden. Die Probe wurde mit einer Auflösung der multispektralen Zeilenkamera von $Res = 100$ dpi aufgenommen und auf jedem Messfeld, basierend auf Bildverarbeitung, das ROI im Zentrum positioniert. Die Auswertung der Farbfehler der spektralen Rekonstruktion wurde in Abhängigkeit der Kantenlänge des ROIs l_{ROI} durchgeführt. Beginnend bei einem einzelnen Pixel bis hin zu einer Kantenlänge von $l_{rel} = l_{ROI}/l_{pr} = 90\%$, was $0.9 \cdot 12 \text{ mm}/(0.254 \text{ mm/Px}) \approx 43 \text{ Px}$ entspricht.

Es wird die farbmetrische Abweichung der durch die Kamera gemessenen Farbkoordinaten in Abhängigkeit von der Messfeldgröße relativ zu den Spektrometerdaten bewertet (siehe Abbildung 41). Hierbei lässt sich erkennen, bis zu welcher Kantenlänge die Farbabweichung abnimmt und ab welchem Wert

die Farbfehler wiederum, aufgrund der Wechselwirkung mit den benachbarten Farbfelder, zunehmen. Hierbei lassen sich die Einflüsse des durch die Mittelung abnehmenden Messrauschens gegenüber den lateralen Wechselwirkungen bewerten. Zusätzlich wurden die 60-fach gemittelten Bilddaten verwendet, um den Einfluss der Probeninhomogenität und der Nachbarschaftswechselwirkung möglichst isoliert bewerten zu können. Durch die zeitliche Mittelung per Überabtastung wird bei den kleinen Messfeldern der Einfluss des zeitlichen Rauschens reduziert. Somit dominieren durch die Mittelung die Einflüsse, verursacht durch die Probeninhomogenitäten.

Zur Vermessung des Einflusses der Probeninhomogenitäten wird bei jeder Kantenlänge jedes Messfeld um einen Pixel lateral und vertikal verschoben. Die resultierenden farbmtrischen Abweichungen werden numerisch analysiert. Aus dieser Betrachtung kann abgeleitet werden, ab welcher Messfeldgröße die Abhängigkeiten durch die örtlichen Inhomogenitäten vernachlässigt werden können.

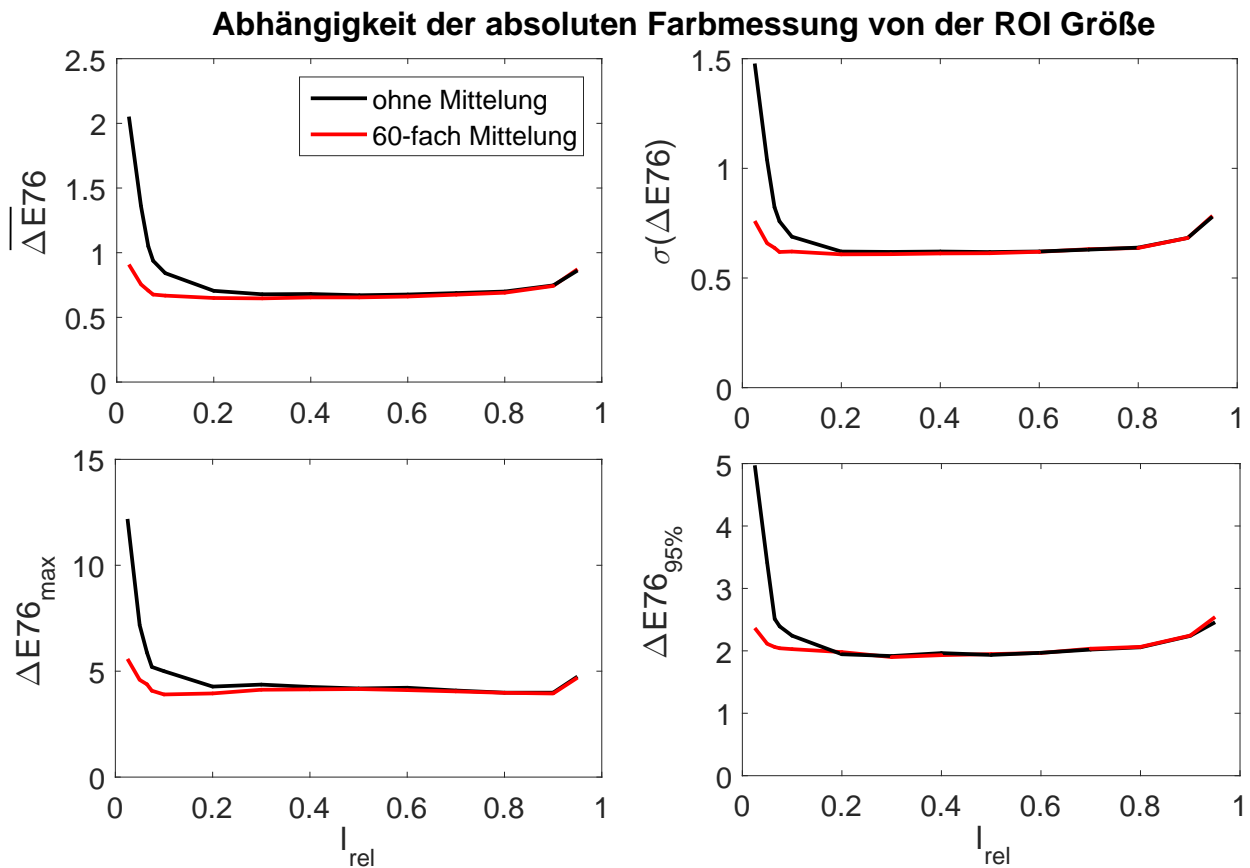


Abbildung 41: Aufgetragen ist die Abhängigkeit der absoluten farbmtrischen Abweichungen in Abhängigkeit der Kantenlänge der ROIs. Hierzu werden der mittlere Farbfehler $\overline{\Delta E76}$, die statistische Verteilung der Farbfehler in Form der Standardabweichung $\sigma(\Delta E76)$, der maximale Fehler $\Delta E76_{max}$ und das 95 % Perzentil $\Delta E76_{95\%}$ aufgetragen. Die roten Kurven zeigen den Fall für die 60-fache Mittelung. Eindrücklich erkennbar ist, dass sich im Falle der gemittelten Daten schon ein konstantes Plateau ab ca. $l_{rel} = 5\%$ Kantenlänge ergibt. Ohne die Mittelung stellt sich das Plateau ab einer Kantenlänge von 20 % ein.

Klar ersichtlich ist in Abbildung 42, dass sich eine optimale Konfiguration finden lässt, bei welcher die Messwerte mit der geringsten farbmtrischen Abweichung zu erwarten sind. Bei Messfeldern, welche eine Kantenlänge kleiner $l_{rel} < 20\%$ aufweisen, zeigt sich eine starke Abhängigkeit bei der lateralen Verschiebung des Messfeldes. Der Einfluss fällt allerdings sehr schnell in ein konstantes Plateau. Die Farbfehler steigen erst wieder an, wenn die ROIs so groß sind, dass bereits unter geringer Verschie-

bung Abweichungen, verursacht durch die Wechselwirkung mit den benachbarten Messfelder, eine Rolle spielen.

Die Daten der von der Messfeldgröße abhängigen absoluten Abweichung zeigen ein anderes Verhalten. Prinzipiell ist ersichtlich, dass ein größeres Messfeld zu geringeren absoluten Abweichungen führt. Es stellt sich im Falle der gemittelten Daten bereits eine konstante, absolute Farbabweichung ab einer Kantenlänge von 10 % ein. Wird die laterale Verschiebung mitbetrachtet, ist das Ergebnis erst ab einer Kantenlänge von 20 % stabil. Somit kann eindeutig abgeleitet werden, dass die Probeninhomogenitäten und die damit verbundene Farbabweichung durch eine Ungenauigkeit der Positionierung der ROIs ab einer Kantenlänge von $l_{rel} > 20\%$ vernachlässigt werden kann. Werden die absoluten Farbabweichungen der Daten ohne Mittelung betrachtet, zeigt sich ebenfalls, dass die Ergebnisse ab einer Kantenlänge von 20 % stabil sind. Wird das Messfeld zu groß gewählt ($l_{rel} > 80\%$), zeigt sich ein Anstieg der farbmtrischen Abweichungen. Zusammengefasst können wir somit ableiten, dass in diesem konkreten Fall robuste Messergebnisse bei einer Kantenlänge von $l_{rel} = 20\ldots 80\%$ zu erwarten sind.

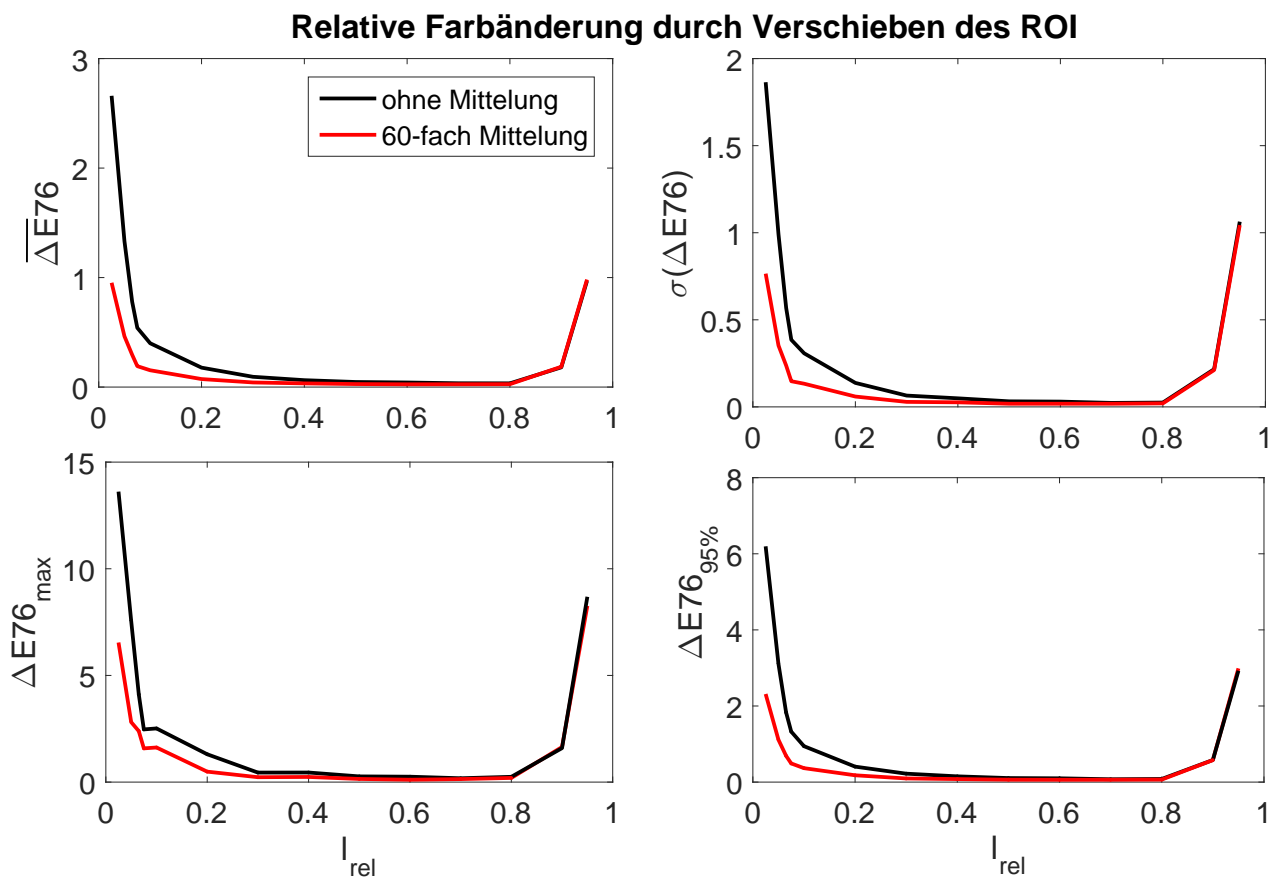


Abbildung 42: Dargestellt sind die farbmtrischen Abweichungen resultierend, aus einer diagonalen Verschiebung, wobei das ROI jeweils um ein Pixel vertikal und horizontal verschoben wird. Aufgetragen ist die aus der Verschiebung resultierende Farbabweichung über die Kantenlänge des jeweiligen ROIs. Die roten Grafen entsprechen den 60-fach gemittelten Bild-daten. Ab einer Kantenlänge von $l_{rel} > 20\%$ sind die gemittelten Daten stabil, ohne Mittelung stellt sich ab ca. 40 % der konstante Messwert ein.

Die hier diskutierten Ergebnisse können nicht beliebig verallgemeinert werden, sondern verlangen nach einer applikationsspezifischen Analyse. Insbesondere tragen hier die Druck- und die Kameraauflösung sowie die Homogenität des eingesetzten Substrates wesentlich zu den Ergebnissen bei. Die hier vorgestellte Methode kann allerdings uneingeschränkt zur Bestimmung der optimalen Messfeldgröße auf unterschiedliche Applikationen übertragen werden. Hierbei kann prinzipiell in zwei Schritten vorgegan-

gen werden. Vorab muss entsprechend der Norm ISO13655 [2009] die minimale und die empfohlene Messfeldgröße bestimmt werden. In einem zweiten Schritt sollte die Kameraauflösung so angepasst werden, dass dieses geringste Messfeld mit zumindest 100 Pixel erfasst wird. Bei der hier vorliegenden Auflösung der Kamera von $Res = 0.254 \text{ mm/Px}$ entspricht das einer Kantenlänge des ROIs von $2.5 \times 2.5 \text{ mm}$, bzw. einer relativen Kantenlänge von $l_{rel} = 20 \%$. Wenn die Messapplikation hier nicht limitierend wirkt, sollte allerdings das Messfeld in jedem Fall so groß wie möglich gewählt werden, da im praktischen Fall auch Verunreinigungen zu einer Messabweichung führen können. Der Einfluss ist bei einem kleineren Messfeld natürlich größer, da die Flächendeckung der Verunreinigung in Relation zum gesamten Messfeld bewertet wird. Durch die endliche MTF des abbildenden Systems empfiehlt sich in jedem Fall ein Mindestabstand zu benachbarten Farbfeldern. Insbesondere wenn diese stark verschiedene Farben und somit einen großen Signalkontrast aufweisen sollte ein Abstand von 10 Px eingehalten werden.

Neben diesen grundlegenden Regeln, sollte jedoch in Vorversuchen die hier vorgestellte systematische Untersuchung durchgeführt werden, um die Ideale Konfiguration der Messfeldgröße abzuleiten. Aus Grafik 41 kann die erreichbare farbmessstechnische Genauigkeit des Systems abgelesen werden. Der mittlere, über alle Farben des Testbeleges gemittelte Farbfehler, liegt bei ca. $\Delta E76 = 0.8$, was hinsichtlich vieler farbmessstechnischer Aufgaben ein hinreichend genauer Wert ist. Jedoch zeigt sich eine relativ hohe Streuung der absoluten Farbfehler, was eindrucklich durch die maximale Abweichung von nahezu $\Delta E76_{max} = 5$ widerspiegelt wird. Für viele Applikationen, insbesondere im Bereich der Automobilindustrie, werden solche hohen absoluten Abweichungen nicht toleriert. Jedoch zeigt der hier behandelte Farbdatenatz eine sehr hohe maximale Farbsättigung, was zusammen mit dem Einsatz von sechs verschiedenen Grundfarben des Inkjet Druckers zu einem sehr großen Farbraum führt. Außerhalb des Druckes sind die in einem Prozess erzielbaren Farbräume in der Regel weitaus kleiner, was eine genauere Kalibrierung der multispektralen Zeilenkamera ermöglicht. In Grafik 42 kann im Falle der optimalen ROI-Kantenlänge der Messfelder die hohe Stabilität der erhaltenen Messdaten abgelesen werden. Bei einer Kantenlänge der eingesetzten ROIs von 50 % liegen die maximalen Abweichungen, verursacht durch eine Verschiebung des Messfeldes, im Bereich von $\Delta E76_{max} = 0.1$. Hier wirkt sich selbst eine weitere 60-fache Mittelung der Bilddaten nicht weiter aus, da hier die Inhomogenitäten der Proben den verbleibenden Einfluss des zeitlichen Rauschens dominieren. Diese sehr hohe Stabilität der Messdaten über den gesamten Farbraum beweist die Einsatzmöglichkeit des Systems in kontrollierenden und regelnden Anwendungen. In der praktischen Anwendung liegt oft eine vom Endkunden abgenommene Referenzprobe vor, welche mit dem Kamerasystem erfasst und als Zielregelwert eingesetzt werden kann. Sollten die absoluten erreichbaren Genauigkeiten einer messtechnischen Aufgabe nicht genügen, kann jedoch aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit der Messergebnisse eine relative Änderung des Prozesses detektiert und somit auch stabilisiert, bzw. geregelt werden.

5.5 Simulationsbasierte Systemanalyse

Auf Basis der in Kapitel 5.1 bestimmten spektralen Systemempfindlichkeiten $\Psi_k^s(\lambda)$ können nun generelle Abhängigkeiten des Systems untersucht werden, indem anhand der Systemempfindlichkeiten und einem Farbdatenatz, bestehend aus Reflexionsdaten $R_i(\lambda)$, Kamerasignale berechnet werden. Auf Basis dieser berechneten Kamerasignale wird die lineare Kalibrierung A der Kamera zur Rekonstruktion der Reflexion bestimmt. Nun kann ausgehend von diesen idealen Kamerasignalen das System kontrolliert gestört werden, indem Fehler wie Rauschen, Fehler der Weißnormierung, Abweichungen von der idealen Schwarzwertkorrektur und die Nichtlinearität der Kamera gezielt ein- und ausgeschaltet werden. Dieser Ansatz bietet einen grundlegenden Zugang, um die Auswirkung einzelner Störparameter auf die Farbmessung isoliert voneinander zu analysieren und somit deren Einfluss auf die Farbmessung bewerten zu können. Die erhaltenen Erkenntnisse können wiederum eingesetzt werden, um gezielt messtechnische Untersuchungen und darauf aufbauend Optimierungen des Farbmesssystems durchzuführen. Das

Einbringen der grundlegenden Messfehler bzw. Störungen wird über einen additiven Offsetfehler O^{pert} , einen relativen Fehler W^{pert} und das aus dem Kameramodell abgeleitete Rauschen $\sigma_K(K_{k,i})$ realisiert:

$$K_{k,i}^{\Psi,pert} = (K_{k,i}^{\Psi,ref} \cdot W^{pert}) + O^{pert} + \sigma_K(K_{k,i}) \quad (59)$$

Bei gemessenen Bilddaten besteht das prinzipbedingte Problem, dass die Störfaktoren alle gemeinsam auftreten und somit eine Separation der einzelnen Einflüsse praktisch unmöglich ist. Im Messverfahren selber können daher die Ursachen der Messfehler nur schwer oder gar nicht isoliert bestimmt werden.

Das Ziel der hier behandelten messdatengestützten Simulation besteht darin, ein besseres Systemverständnis zu erlangen. Dieses ermöglicht es im Anschluss, gezielt an dem Messsystem technische Verbesserungen einzubringen. Die hier entwickelten Methoden können weiterhin eingesetzt werden, um applikationsspezifisch eine Sensitivitätsanalyse des Messsystems durchzuführen. Auf deren Basis kann die technologische Ausprägung des Farbmesssystems im Vorfeld definiert werden. Die betrachteten Störparameter wurden aus praktischen Überlegungen und Erfahrungen abgeleitet, beziehungsweise aus zu erwartenden Einflüssen eines Kamerasystems bestimmt. Es können insbesondere im System auftretendes Streulicht, elektronische Instabilitäten der Referenzspannungen, eine nicht ideale Transfereffizienz des CCD-Sensors (Sensor MTF), sowie die endliche MTF der abbildenden Optik bei niedrigen Frequenzen zu einer Störung des Signals führen. Durch diese Effekte wird beispielsweise eine Erhöhung oder auch eine Verringerung des Dunkelsignals hervorgerufen, was natürlich zu Messfehlern in der Farbmessung führt. Der Grund liegt darin, dass diese additiven Fehler zu einer Abweichung des Systems vom idealen linearen Kameramodell führen. Daher wird dieser Einfluss im Folgenden durch die Simulationen untersucht.

Es kann durch Schwankungen der Beleuchtung oder auch einer temperaturabhängigen Quanteneffizienz des Sensors zu einer Veränderung des Weißpunkts des Systems kommen, was zu einer linearen Skalierung der gemessenen Kamerasignale führt. Auch dieser Einfluss wird im Folgenden betrachtet. Basierend auf den Messdaten der Linearität des Systems (siehe Kapitel 4) wird der Einfluss der ermittelten maximalen Nichlinearität auf die kamerabasierte Farbmessung untersucht. Weiterhin wird hier nochmals betrachtet, welche messtechnischen Abweichungen durch das Systemrauschen zu erwarten sind. In dem Zusammenhang wird für den Fall von nicht vorhandenen Inhomogenitäten der Objektoberfläche die endliche Signalauflösung von 8 bit bei realem Systemrauschen durch die Simulationen mitberücksichtigt. Somit wird hier der Fall des geringsten zu erwartenden Signalrauschens, welches im realen Fall noch durch Inhomogenitäten des Objektes verstärkt wird, betrachtet. Wie schon vorher diskutiert, muss die Signalauflösung im Zusammenhang mit dem Rauschen des Signals betrachtet werden. Prinzipiell verlangt ein geringeres Rauschen nach einer höheren digitalen Auflösung des gemessenen Signals.

Bei den folgenden Untersuchungen wurde abermals der Datensatz des im Inkjetverfahren hergestellten Referenzbeleges eingesetzt. Basierend auf den Referenzmessung der Reflexionen der 660 Proben und auf den Messdaten der spektralen Systemempfindlichkeit des multispektralen Zeilenkamerasystems wurden die zu erwartenden Kamerasignale berechnet. Dieser Datensatz von Kamerasignalen wurde herangezogen, um wiederum die inverse Abbildung, also die Systemkalibrierung A , zu bestimmen. Als Referenz dienen nun die farbmetrischen Abweichungen, welche bei der direkten Anwendung der Kalibrierung auf die berechneten Kamerasignale erhalten werden. Die Daten hierzu sind in Abbildung 43 schwarz dargestellt. Die erhaltenen Farbfehler resultieren allein aus dem nicht perfekten Filtersatz des Kamerasystems sowie aus dem Verfahren zur Berechnung der Kalibrierung. Dies sind somit die geringsten zu erwartenden Farbfehler des perfekten linearen Kamerasystems, welches ideal durch das Modell (Gleichung 21) beschrieben wird.

Im Folgenden werden nun realistische, aus Messdaten ermittelte Abweichungen auf die berechneten Kameraantworten addiert und diese zur Rekonstruktion der Farbkoordinaten eingesetzt. Somit lassen sich auf einfache Art die zu erwartenden Messfehler der Kamera auf deren Auswirkung auf die Farbmessung untersuchen. Im ersten Schritt wird aus den Messdaten nach dem EMVA Standard das reale Systemrauschen in die Daten eingebracht. Hierzu wurde die Photontransferkurve linear durch Regression angenähert. Aus dieser Näherung lässt sich nun zu jedem Kamerasignal die real zu erwartende Varianz gegeben durch das Dunkel- und Schrotrauschen bestimmen. In der Berechnung ist die Kantenlänge des

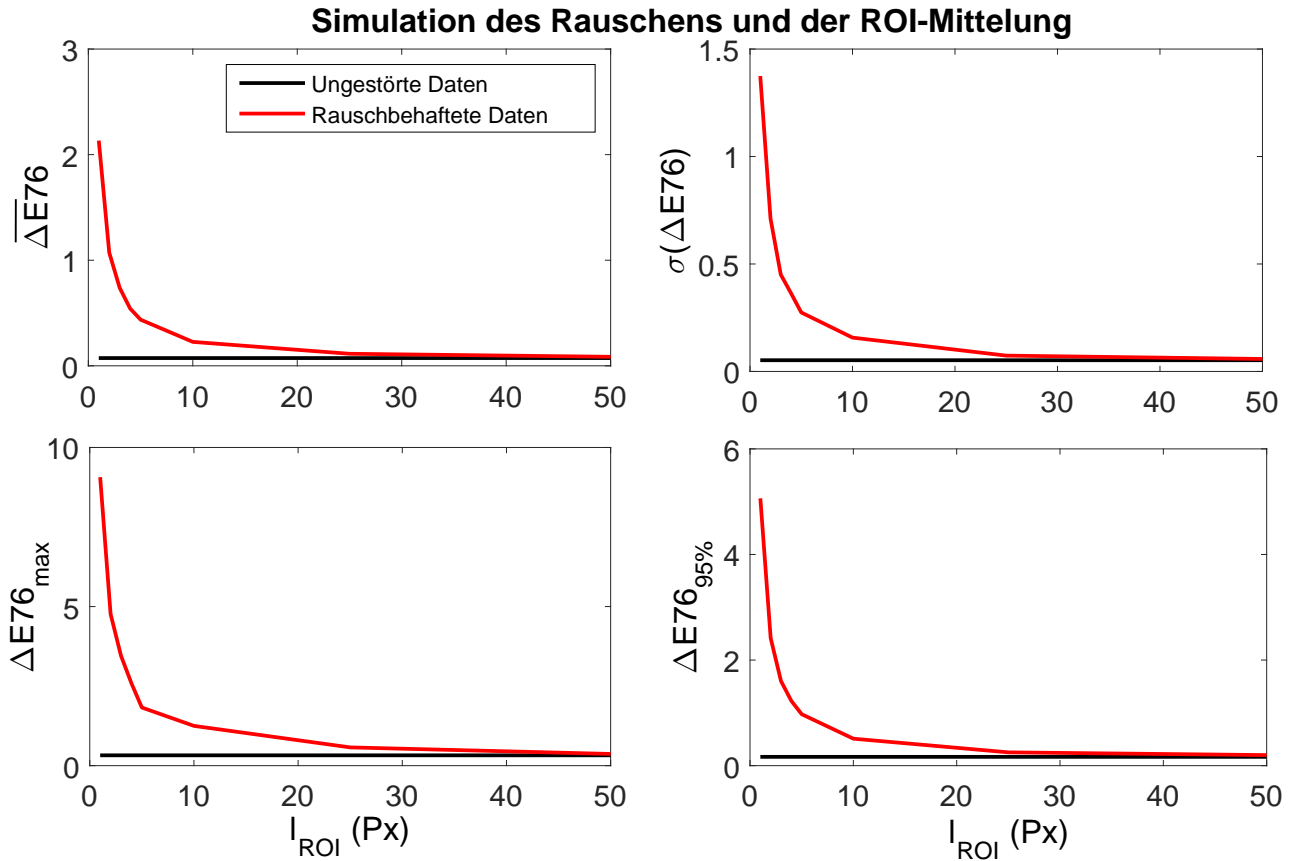


Abbildung 43: Aufgetragen sind die simulierten farbmimetrischen Abweichungen (rote Grafen) unter Variation der Kantenlänge des ROI, auf welchem der Farbwert ermittelt wird. Die einzelnen Pixel werden entsprechend dem realen Systemrauschen gestört und anschließend analog zum Messprozess über das ROI gemittelt. Ab einer Kantenlänge von $l_{ROI} = 30$ Px entsprechen die Werte dem ungestörten Fall (Grafen in schwarz).

Messfeldes eine Variable. Für jede betrachtete Ausdehnung des Messfeldes wird über einen Zufallsgenerator entsprechend der Normalverteilung für jedes einzelne Pixel ein verrauschter Signalwert erzeugt. Die Varianz wird anhand des mittleren Kamerasignalwertes, welcher in dem linearen Modell der Photontransverkurve ausgewertet wird, bestimmt. Über dieses Messfeld wird dann für jede Farbe und für jeden Kanal wiederum gemittelt, was somit eine gute Nachbildung des bilddatenbasierten Messprozess darstellt, da jeder Signalwert eines jeden Pixels mit dem real gemessenen Rauschen behaftet wird.

Aus Abbildung 43 ist ersichtlich, dass ab einer Kantenlänge des ROIs von ca. $l_{ROI} = 30$ Px der durch das Systemrauschen eingebrachte farbmimetrische Fehler vernachlässigt werden kann. In den vorher diskutierten Messdaten zeigte sich bereits keine Verbesserung der Daten ab einer Kantenlänge des ROIs von $l_{ROI} = 10$ Px, die Erklärung ist hierfür in der Summe der Einflüsse auf das System zu sehen. Die weitere Verringerung der Farbmessfehler für ROIs, welche größer als 10 Pixel sind, liegen fast eine Größenordnung unter den absoluten zu erreichenden messtechnischen Abweichungen. Außerdem werden hier in der Simulation Wechselwirkungen benachbarter ROIs nicht betrachtet.

Somit stellt sich also heraus, dass bei der isolierten Betrachtung des Systemrauschens idealerweise ROIs mit einer Kantenlänge von mehr als 30 Pixeln eingesetzt werden sollten, wobei der größte zu erwartende Einfluss bis zu einer Kantenlänge von 10 Pixeln auftritt. Diese Erkenntnis ist konsistent mit den zuvor analysierten Messdaten (siehe Abbildung 41).

Im nächsten Schritt wird der Einfluss eines additiven Fehlers betrachtet, welcher im System durch Streulicht, die endliche optische MTF oder elektronische Kopplungseffekte hervorgerufen werden kann.

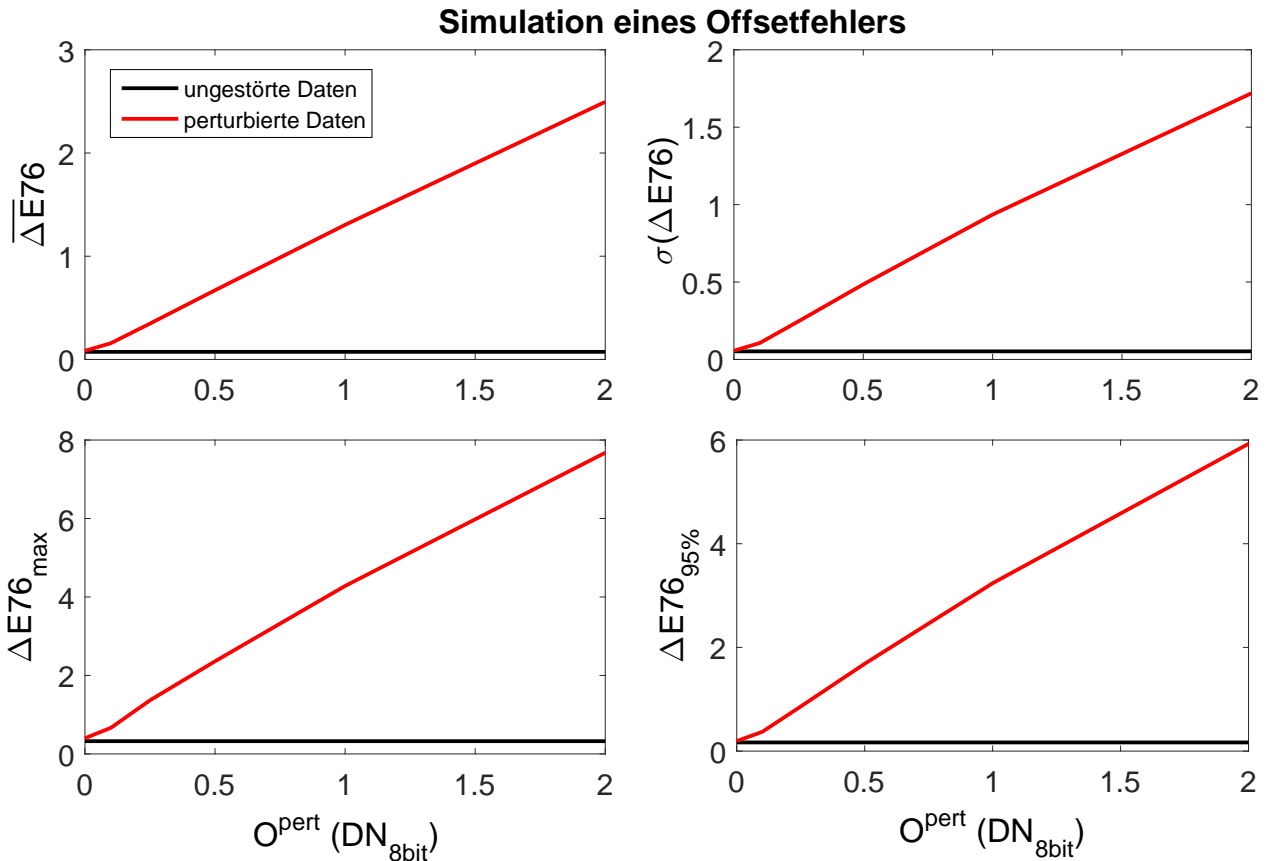


Abbildung 44: Zu sehen ist der Einfluss eines eingebrachten Signaloffsets auf die kamerabasierte Farbmessung. Selbst additive Fehler von einem halben Digitalwert in 8 bit führen zu massiven Abweichungen. Der mittlere Farbfehler wird hier um ca. 1 $\Delta E76$ erhöht, wobei der maximale Fehler auf $\Delta E76_{\text{max}} = 2$ anwächst. Die Stabilisierung des Dunkelsignals sollte somit besser als 1/4 Graustufe in 8 bit sein. Hierin ist systembedingt die höchste messtechnische Herausforderung zu sehen.

In Abbildung 44 sind die Ergebnisse dargestellt. Hier zeigt sich, dass in der kamerabasierten Farbmessung das Dunkelsignal außerordentlich gut stabilisiert werden muss. Selbst sehr geringe additive Signalfehler von nur 0.5 Digitalwerten bei 8 bit Auflösung, also ca. 1/500 des maximalen Signals, führen zu massiven zusätzlichen Farbfehlern. Der maximale Farbfehler wächst hier schon auf $\Delta E76_{\text{max}} = 2$ an, der mittlere Farbfehler vergrößert sich unter diesen Umständen schon auf $\overline{\Delta E76} = 1$. Da prinzipiell in der absoluten Farbmessung immer absolute Genauigkeiten von unter einem $< 1 \Delta E76$ angestrebt werden, muss das Dunkelsignal daher etwa auf 0.25 DN bei 8 bit stabilisiert werden. Weitergehende Messungen haben gezeigt, dass hierbei insbesondere die MTF des Sensors limitierend wirkt. Aufgrund einer endlichen analogen Signalbandbreite der Verstärker wird das ausgelesene Spannungssignal verzerrt, was insbesondere eine Beeinflussung von niedrigen Kamerasignalen durch benachbarte hohe Kamerasignale führt. Zusätzlich ist in einem CCD-Sensor die totale Transfereffizienz endlich. Das bedeutet, dass die durch Absorption erzeugten elektrischen Ladungsträger nicht vollständig transferiert werden. Durch diesen Effekt erfahren Bereiche des Sensors, welche nur geringfügig belichtet werden, eine Signalerhöhung durch benachbarte stark belichtete Sensorregionen. Hierbei muss die Ausleserichtung des Sensors berücksichtigt werden, da nur schwach belichtete Sensorbereiche betroffen sind, welche nach den hoch belichteten ausgelesen werden. Es wurden mehrere Versuche unternommen, um diese Effekte zu kompensieren. Dabei hat sich gezeigt, dass diese Ausleseeffekte sich nichtlinear verhalten, was es sehr viel schwieriger gestaltet, diese in Echtzeit zu kompensieren. In der wissenschaftlichen Literatur finden sich

Kompensations- und Charakterisierungsansätze [Massey u. a., 2014; Anderson und Bedin, 2010], welche allerdings hier nicht direkt eingesetzt werden konnten, da diese aufgrund der iterativen Berechnung sehr lange Rechenzeiten benötigen. Der lineare Anteil der Tiefpasswirkung durch die endliche Transfereffizienz konnte durch eine Dekonvolution verringert werden. Darüber hinaus führten Anpassungen an der CCD-Ausleseelektronik zu der angestrebten Stabilisierung des Dunkelsignals. Die vorangegangenen Messungen (Abbildung 43) deuten darauf hin, dass trotz dieser Maßnahmen ein gewisser Mindestabstand zu benachbarten Farbfeldern eingehalten werden muss, um die verbleibenden Effekte durch die Kopplung vernachlässigen zu können.

Als Beleuchtung werden hier ausschließlich Hochleistungs-LEDs eingesetzt, da es derzeit sonst keine vergleichbar leistungsstarke und flexibel einsetzbare Lichtquelle gibt, welche spektral den gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich abdeckt. Der Farbort und die optische Effizienz von LEDs ist abhängig von der Betriebstemperatur. Zusätzlich degradieren, bzw. altern LEDs. Insbesondere die im Falle von weißen LEDs eingesetzten Konversionsfarbstoffe zeigen Veränderungen über die Lebensdauer. Eine Übersicht über die verschiedenen Effekte der Degradation wurde von Chang u. a. [2012] erarbeitet. Zusammengefasst ist davon auszugehen, dass die Bestrahlungsstärke auf dem Objekt Änderungen über die Betriebsdauer aufweisen kann. Daher werden diese Einflüsse im Folgenden ebenfalls durch Simulationen untersucht.

In Abbildung 45 sind die Ergebnisse dargestellt, welche bei der Simulation einer Instabilität des Weißpunktes zu erwarten sind. Neben den auftretenden Schwankungen und Veränderungen der Lichtquelle, ist auch die Quanteneffizienz des CCD-Sensors temperaturabhängig. In den Simulationen ist eine weitestgehend lineare Abhängigkeit der resultierenden Farbmessfehler ersichtlich. Der mittlere Fehler liegt bei einer Abweichung des Weißwertes von 2 % bei ca. $\overline{\Delta E76} = 1$. Bei einer Abweichung von 1 % halbiert sich der Farbfehler und fällt somit deutlich unter die Grenze von $1 \Delta E76$.

Da durch die diskutierten Einflüsse des Sensors und der Beleuchtung mit Änderungen des Kamerasignals von bis zu 10 % gerechnet werden muss, ist eine aktive Stabilisierung des Weißwertes unumgänglich. Die multispektrale Zeilenkamera verfügt über eine aktive Signalregelung, welche hier eingesetzt wird. Hierbei wird am Rand des Sichtfeldes der Kamera eine statische Weißreferenz in Form einer kleinen Referenzkachel eingebracht, welche permanent von der Kamera erfasst wird. Hierauf kann die Kamera den mittleren Weißwert messen. Eine interne Verstärkungsregelung stabilisiert den gemessenen Signalwert auf einen vorgegebenen Referenzwert. Durch diese Regelung können die Änderung verursacht durch die Beleuchtung-, sowie die Schwankungen durch den Sensor kompensiert werden. Hierbei muss lediglich sicher gestellt werden, dass die Reflexion der eingesetzten Referenz über die Zeit konstant bleibt. In typischen industriellen Umfeldern muss daher diese Referenzkachel automatisch oder manuell gereinigt werden, um eine langfristige Stabilisierung des Signalwertes der Kamera sicherzustellen. Der hier beschriebene Ansatz führt zu einer Stabilisierung auf 0.4 % (entsprechend einer Graustufe in 8 bit), was angesichts der angeführten Analysen hinreichend für die Stabilisierung ist. Eine weitere Verbesserung wurde eingebracht, indem eine softwareseitige digitale Nachkorrektur mit einem noch geringeren Faktor eingebracht wurde, was eine Verbesserung der Genauigkeit der Regelung um einen Faktor 10 ermöglicht. Somit kann zusammenfassend festgehalten werden, dass Schwankungen des Weißpunktes des Farbmesssystems die Genauigkeit der Messdaten nicht limitieren und werden somit im Weiteren nicht mehr diskutiert.

Es verbleiben noch die Betrachtung der Einflüsse der endlichen digitalen Signalauflösung und der realen Nichtlinearität der Kamera. In Abbildung 46 sind die Histogramme über die Farbfehler der verschiedenen Konfigurationen der Simulationen dargestellt. In schwarz sind wieder die idealen Ergebnisse aufgetragen, die roten Datenpunkte stellen den Fall des realen Systemrauschens bei einer Messfeldgröße von $l_{ROI} = 10 \text{ Px}$ dar. In der Legende werden dieselben Werte aufgeführt, wie sie in den vorangegangenen Auswertungen betrachtet wurden. Hier wird allerdings keine kontinuierliche Variation der Fehler verursachenden Parameter untersucht, da die Nichtlinearität und die endliche Signalauflösung lediglich berücksichtigt oder vernachlässigt werden können. Eine kontinuierliche Variation der Parameter ist daher nicht möglich.

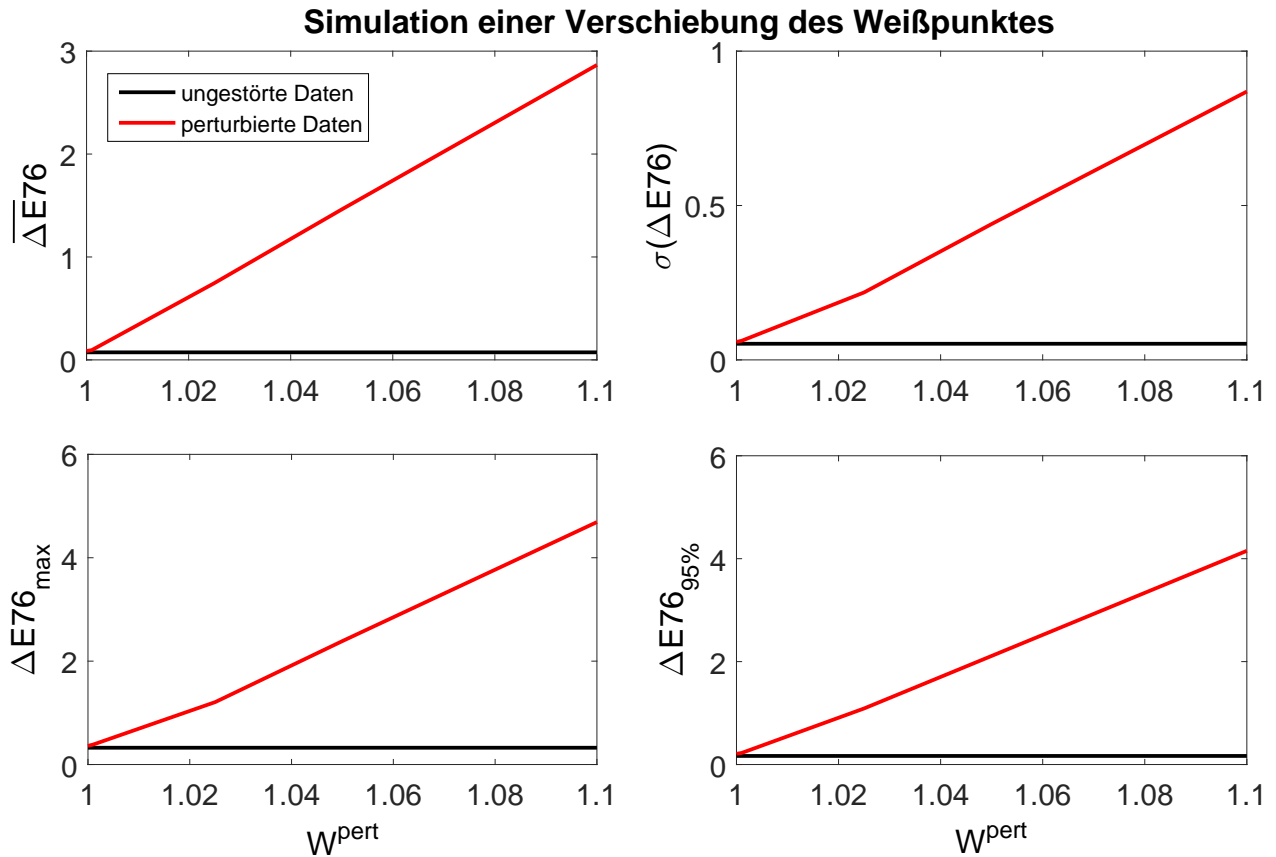


Abbildung 45: Aufgetragen ist der resultierende Farbfehler über die relative Variation des Kamerasignals, was effektiv einer Verschiebung des Weißpunktes entspricht. Das Verhalten ist weitestgehend linear. Wird der Normierungsfehler auf 1.01, also auf 1 % beschränkt, ist der maximal zu erwartende Farbfehler geringer als 1 $\Delta E76$.

Die blauen Datenpunkte zeigen neben dem Signalrauschen die zusätzliche Limitierung durch die Datenerfassung in 8 bit. Zur Berechnung der Resultate, wurde vor der Mittelung der einzelnen Messfelder die Signalaufösung durch runden auf die 8 bit Auflösung limitiert. Hier ist ersichtlich, dass sich der mittlere zu erwartende Farbfehler durch diese Limitierung nur unwesentlich von 0.23 auf 0.26 verschlechtert. Eine stärkere Beeinflussung ist bei einem maximalen Farbfehler ersichtlich. Bei diesem steigt die farbmtrische Abweichung zur Referenz von 0.98 auf 1.46. Es kann nun argumentiert werden, dass eine Erhöhung der Bitauösung im System vorgenommen werden sollte. Jedoch ist bei vielen Applikationen die Datenbandbreite durch die Schnittstelle stark limitiert, da bereits bei 8 bit angesichts der hohen Transportgeschwindigkeiten (insbesondere im Druck) die Kameralink-Schnittstelle voll ausgeschöft wird. Vergleichende Messungen mit höherer Signalaufösung haben hingegen gezeigt, dass hier keine Verbesserung der Messungen erzielt werden kann. Letzteres wird darauf zurück geführt, dass im realen Druck zusätzliche Inhomogenitäten der Probenoberfläche zu einer höheren Varianz der Kamerasignale führt, weswegen eine höhere digitale Signalaufösung nicht notwendig ist, bzw. zu keiner Verbesserung führt. Außerdem zeigt sich in der realen Applikation, dass andere Parameter, wie etwa der konstante Abstand der Probenoberfläche zur messenden Kamera, eher limitierend wirken als die digitale Signalaufösung. Die vorher diskutierten Einflüsse, welche das Dunkelsignal verfälschen, haben auch einen höheren Einfluss als die Signalaufösung des einzelnen Pixels, weswegen darauf verzichtet werden kann, die digitale Signalaufösung des einzelnen Pixels zu erhöhen. Im nächsten Schritt wurde in den Simulationen die real gemessene Nichtlinearität eingebracht. Es zeigt sich hierbei, dass unter Berücksichtigung der Nichtlinearität der mittlere Farbfehler lediglich von 0.23 auf 0.25 erhöht wird. Der Einfluss auf den maximalen

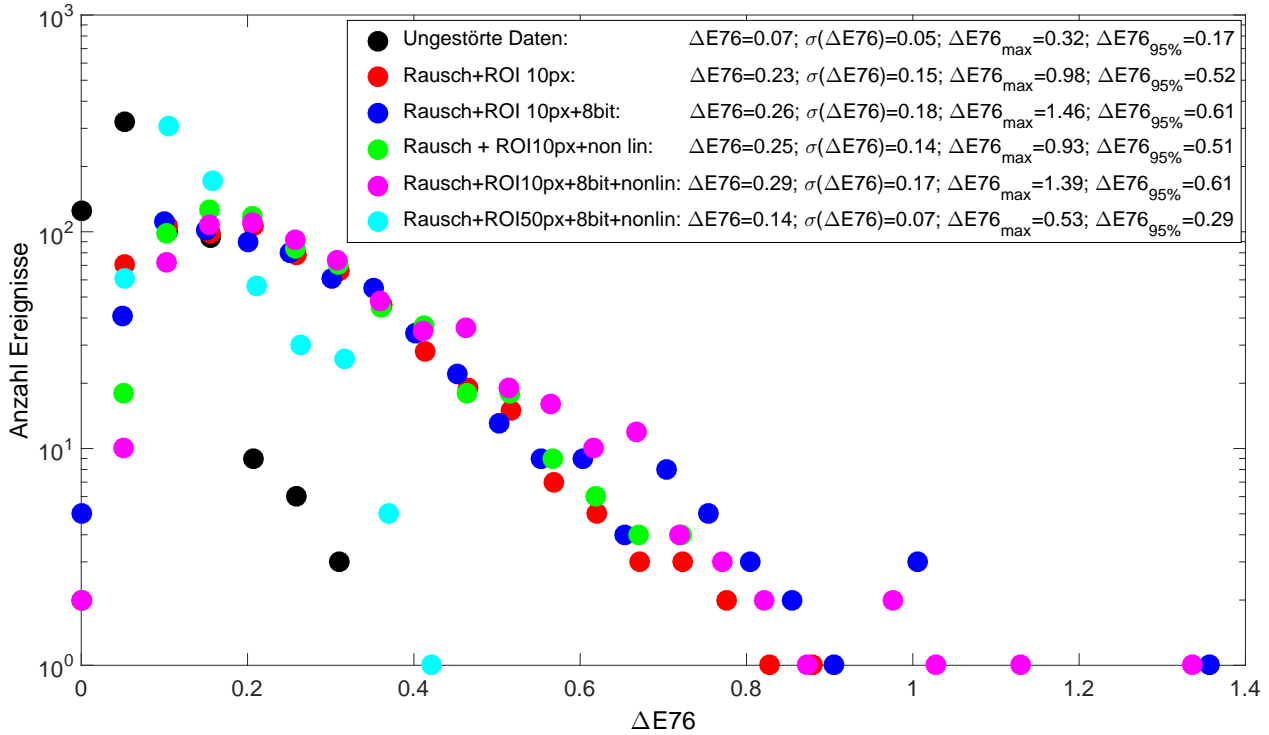


Abbildung 46: Aufgetragen sind die Histogramme für verschiedene Konfigurationen verschiedener Fehlerquellen. Als Referenz dient hier wieder der fehlerfreie Datensatz. Eingebbracht werden sukzessive das Systemrauschen bei einer Kantenlänge der ROI von $l_{ROI} = 10 \text{ Px}$, der zu erwartende Fehler durch die endliche Signalauflösung (8 bit), die vermessene Nichtlinearität der Kamera sowie die Kombination aus Nichtlinearität und endlicher Signalauflösung. Als letzter Datensatz wird hier noch der Fall einer ROI Kantenlänge von $l_{ROI} = 50 \text{ Px}$ betrachtet. Da in diesem Fall das Signalrauschen wiederum vernachlässigt werden kann, wird ersichtlich, dass die digitale Signalauflösung und die Nichtlinearität das Messsystem keinesfalls limitieren.

Farbfehler fällt hierbei sehr gering aus. Dieser verringert sich sogar etwas von 0.98 auf 0.93. Daher kann eindeutig abgeleitet werden, dass die Nichtlinearität der Kamera die Farbmessung in keiner Weise limitiert. Die realen Auswirkungen liegen weit unterhalb der relevanten Grenzen. Im nächsten Schritt wurde die beschränkte Signalauflösung und die Nichtlinearität gemeinsam betrachtet. Auch hier steigt der mittlere Farbmessfehler nur auf $\Delta E76 = 0.29$ an. Um zu verdeutlichen, dass hier die wesentliche Limitierung im Systemrauschen liegt, wurde in einem letzten Schritt die Messfeldgröße auf $l_{ROI} = 50 \text{ Px}$ vergrößert. Hierbei fällt trotz der eingebrachten Abweichungen durch die 8 bit Signalwerte und durch die Nichtlinearität der mittlere Farbfehler auf 0.14. Hieraus wird abermals ersichtlich, dass die Nichtlinearität und die 8 bit Signalauflösung die Farbmessung nicht limitieren, da sonst nicht zu erwarten wäre, dass sich der mittlere Fehler so deutlich verringert.

5.6 Zusammenfassung

Durch das Systemrauschen, die Nichtlinearität des Kamerasensors und die Beschränkung der Signalwerte auf 8 bit lassen sich die realen mit dem System erhaltenen Farbabweichungen (siehe Abbildung 41) nicht erklären. Die hier bestimmten Auswirkungen fallen zu gering aus. Jedoch muss ein besonderes Augenmerk auf die Stabilität des Dunkelsignals gelegt werden. Es zeigen sich sehr deutliche Einflüsse durch ein gestörtes Dunkelsignal, welche zusätzlich nicht einfach messtechnisch zu erfassen und algo-

rhythmisch zu kompensieren sind. Die dominanten Einflüsse, namentlich die endliche MTF der Optik und des Sensors, können durch einen hinreichenden Abstand eines Messfeldes zu den benachbarten Feldern umgangen werden. Basierend auf den Messungen des Systemrauschens, der Nichtlinearität des Kamerasensors und der präzisen Vermessung der Systemempfindlichkeiten konnten hier unter Einsatz des linearen Kameramodells wesentliche messtechnische Fehlereinflüsse charakterisiert werden. Die entwickelte Methodik eignet sich auch für die quantitative simulationsbasierte Charakterisierung von weiteren kamerabasierten Messsystemen. Voraussetzung hierfür ist eine isolierte messtechnische Charakterisierung der wesentlichen Systemkomponenten, beziehungsweise der wesentlichen Systemeigenschaften. Diese können kollektiv herangezogen werden, um in einem rechnerischen Modell das grundlegende Verhalten des Messgerätes unter verschiedenen Bedingungen abzuleiten. Die hier vorgestellten Ergebnisse haben wesentlich zur Entwicklung und der damit verbundenen Verbesserung der multispektralen Zeilenkamera beigetragen. Die wesentliche Erkenntnis liegt in der Sensitivität des Systems und des damit verbundenen Verfahrens der Farbmessung hinsichtlich Instabilitäten des Dunkelsignals. Somit konnten mit einem rechnerischen Modell mit überschaubarer Komplexität wesentliche Aussagen über die Auswirkung von systematischen und von statistischen Messfehlern getroffen werden.



6 Charakterisierung des zeilenkamerabasierten 3D-Messsystems

Einleitend wird ein erweitertes Verständnis der Schärfentiefe einer optischen Abbildung entwickelt, welches im weiteren Verlauf hinsichtlich der Charakterisierung der Abhängigkeiten der MTF der optischen Abbildung über den dreidimensionalen Raum angewendet wird. Weiterhin wird das Messrauschen der 3D-Messung im Detail charakterisiert und qualitativ in Zusammenhang mit den Messdaten der MTF gebracht.

6.1 Frequenzabhängige Schärfentiefe

Die Schärfentiefe eines abbildenden Systems beschreibt den Bereich, in welchem der Sensor, beziehungsweise das Objekt sich befinden kann und die Abbildung keine messtechnisch erkennbaren Qualitätsverluste hinsichtlich der übertragenen Frequenzen erleidet. Wird der Sensor oder das Objekt aus der optimalen Lage der gegebenen optischen Abbildung verschoben, wirkt sich das durch eine Defokussierung aus. Das Bild verliert somit an Information durch eine Reduktion der MTF . Letztendlich wirkt die objekt- oder bildseitige Defokussierung als zusätzlicher Tiefpass auf die erfassten Bildinformationen.

Die MTF beschreibt die frequenzabhängige Übertragungsfunktion des optischen Systems, daher soll auch hier der Einfluss der Defokussierung frequenzabhängig betrachtet werden. Das wird bei den späteren Analysen relevant sein, da für eine verlässliche Berechnung der Höheninformation aus den Bilddaten wichtig ist, welche Frequenzen auf dem Objekt vorhanden sind und wie diese im Verhältnis zur eingesetzten Fenstergröße der Bildkorrelation l_w stehen. Die Schärfentiefe kann durch rein geometrische Überlegungen entsprechend der Arbeit von Luhmann [2010] hergeleitet werden. Ein Bildpunkt auf dem Sensor wird durch die Fokussierung aller durch die optische Apertur a tretenden Strahlen erzeugt. Bei einer idealen (Loch-) Kamera ohne weitere Abbildungsfehler schneiden sich alle einfallenden Strahlen genau in dem selben Bildpunkt. Wird nun der Sensor aus seiner optimalen Lage um den Betrag $DOF_b/2$ verschoben, wird die Bildinformation entsprechend dem Winkel zwischen den äußersten Randstrahlen und der Defokussierung $DOF_b/2$ auf den Unschärfekreis u vergrößert (siehe Abbildung 47).

Zur Berechnung der theoretischen Schärfentiefe wird nun die einfache Bedingung eingeführt, dass der Unschärfekreis maximal die Kantenlänge eines Pixels (l_{px}) betragen darf, was der Auflösung der digitalen Abtastung des Bildes entspricht. Für die bildseitige Schärfentiefe ergibt sich somit über Anwendung des Strahlensatzes:

$$DOF_b = 2 \frac{u \cdot b}{a} = 2u \cdot k(1 + m) = 2 \cdot l_{px} \cdot k(1 + m) \quad (60)$$

Hierbei ist $k = f/a$ die Blendenzahl. Im letzten Schritt wurde der Unschärfekreis gleich der Kantenlänge der Pixel gesetzt $u = l_{px}$. Exemplarisch kann nun die sensorseitige Schärfentiefe von einer Kamera mit der Auflösung von $Res = 5\mu m/Px$ und einem Sensor mit einer Pixelgröße von $l_{px} = 10\mu m$ bei der Blende $k = 8$ bestimmt werden. Der Abbildungsmaßstab ist in diesem Fall $m = 10\mu m/5\mu m = 2$, was zu einer Schärfentiefe von $\Delta b = 2 \cdot 8(1 + 2)10\mu m = 480\mu m$ führt.

Nun ist die sensorseitige Schärfentiefe vor allem für den Produktionsprozess, also für die Montageteranzen der Optik und des Sensors relevant. Für die messtechnische Applikation hingegen ist die objektseitige Schärfentiefe von Interesse, da diese den messbaren Höhenbereich auf dem zu inspizierenden

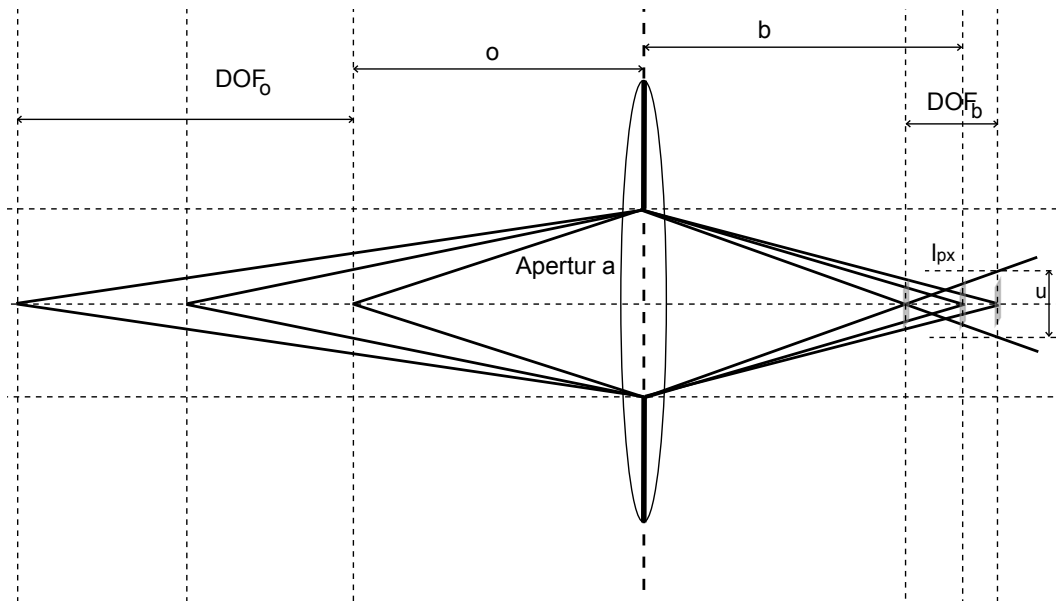


Abbildung 47: Die sensorseitige, bzw. bildseitige Schärftiefe ist geometrisch der Bereich DOF_b , in welchem der Unschärfekreis u verursacht durch die Defokussierung kleiner als die Kantenlänge der Pixel l_{px} des Sensors ist. Der Öffnungswinkel ist durch die Bild- und Objektweite sowie durch die Apertur a des optischen Systems gegeben. Analog bestimmt sich die objektseitige Schärftiefe durch die sensorseitige Defokussierung verursacht durch ein Verschieben des Objektes um $DOF_o/2$. (Darstellung in Anlehnung an Jähne [2012, Abb.3.9])

Objekt widerspiegelt. Auf Basis der selben Betrachtungen wie oben kann die objektseitige Schärftiefe wie folgt bestimmt werden. Hier wird nun der aus der objektseitigen Defokussierung geometrisch resultierende Unschärfekreis betrachtet, woraus sich nach Luhmann [2010] ergibt:

$$DOF_o = \frac{2 \cdot l_{px} \cdot k(1 + m)}{m^2 - \left(\frac{l_{px} \cdot k}{f}\right)^2} \quad (61)$$

Das selbe optische System wie vorher resultiert nun in der objektseitigen Schärftiefe von $DOF_o = 120\mu m$.

In diesem einfachen Beispiel zeigt sich nun schon das prinzipielle Problem bei der Auslegung eines hochauflösenden 3D-Stereosystems. Die Applikation verlangt typischerweise bei diesen optischen Auflösungen bedingt durch die Ausdehnung der Objekte einen Höhenmessbereich, der mindestens $\Delta o_{max} = 1mm$ beträgt. Die berechnete Schärftiefe kann intuitiv für eine solche Messaufgabe nicht hinreichend sein. Da die Schärftiefe näherungsweise proportional zur Blendenzahl k ist, scheint es naheliegend, die Blendenzahl immer weiter zu erhöhen, also die Apertur hinreichend klein zu wählen. Diese Herangehensweise ist allerdings aus zwei Gründen nicht praktikabel. Einerseits verringert sich die optische Bestrahlungsstärke auf dem Sensor quadratisch mit der Apertur a und somit auch mit der Blendenzahl k , da die gesamte eingekoppelte Lichtleistung proportional zur Fläche der optischen Apertur ist. Somit muss zum Erlangen der doppelten Schärftiefe bereits die Bestrahlungsstärke auf dem Objekt oder die Integrationszeit um einen Faktor 4 erhöht werden, um das selbe SNR zu erhalten. Oft muss erheblicher technischer Aufwand getrieben werden, um die Bestrahlungsstärke derart stark zu erhöhen, insbesondere, wenn bei hoher optischer Auflösung mit geringer Integrationszeit gearbeitet wird. Auch limitiert eine zu weit geschlossene Apertur der Optik durch Beugung die MTF und somit das effektive Auflösungsvermögen des Systems.

Gerade in der Mikroskopie, wie auch in der optischen Lithografie, ist die Beugungslimitierung von abbildenden optischen Systemen stets relevant, da hier mit optischen Auflösungen gearbeitet wird, de-

ren Größenordnung vergleichbar mit der Wellenlänge des Lichtes ist. Die endliche Apertur einer Optik führt dazu, dass selbst bei einer idealen Optik das Beugungsbild der Kreisöffnung als Tiefpass mit den Bildinformationen gefaltet ist und dadurch die maximal erreichbare Systemauflösung limitiert wird. Das Beugungsbild einer Blendenöffnungsfunktion ist nach dem *Huygenschen* Prinzip durch deren Fouriertransformierte gegeben. Im Falle einer Kreisöffnung ergibt sich als deren Beugungsbild eine Besselfunktion erster Ordnung. Der Radius r_a der nullten Beugungsordnung ist bestimmt durch die inverse Apertur, die Wellenlänge des Lichts und durch die Bildweite:

$$r_a = 1.22 \frac{\lambda b}{a} = 1.22 \cdot \lambda \cdot k_{eff} = 1.22 \cdot \lambda \cdot k(1 + m) \quad (62)$$

Wobei $k_{eff} = b/a$ die effektive Blendenzahl zur Bildweite b ist, welche den bildseitigen Öffnungswinkel der Strahlenbündel beschreibt. Im letzten Schritt wurde die Bildweite durch den Abbildungsmaßstab und die Brennweite ausgedrückt. Direkt ersichtlich wird somit, dass mit höherer Auflösung die Blende vergrößert werden muss, sodass weiterhin das Auflösungsvermögen nicht durch die Beugung an der Blendenöffnung limitiert wird. Das auftretende Bild des Beugungsmusters wird auch als *Airy'sches* Beugungsscheibchen beschrieben. Zwei beieinander liegende Punkte können somit in der Abbildung voneinander getrennt, also optisch aufgelöst werden, wenn ihr Abstand mindestens r_a beträgt. Also wenn das Beugungsmaximum des zweiten Scheibchens auf das Minimum des ersten Beugungsscheibchens fällt.

In der optischen Lithografie, welche insbesondere wichtig für die Herstellung von halbleiterbasierten Bauteilen ist (Prozessoren, Sensoren, integrierte Schaltungen), wurde mit der stetigen wachsenden Konzentration an Bauteilen und der damit einhergehenden Verkleinerung der kleinsten logischen Elemente, die Wellenlänge des zur Belichtung eingesetzten Lichts kontinuierlich verringert. Außerdem werden für die Lithografie und die Mikroskopie die wohl aufwendigsten abbildenden Optiken entworfen, da eine große Apertur nach sehr komplizierten Kompensationen der optischen Abbildungsfehler verlangt. Im Falle einer einfachen Auslegung würde wiederum die Abbildungsleistung durch das Design und die Toleranzen limitiert und nicht durch die Beugung.

Zusammengefasst lässt sich die Schärfentiefe und somit der Höhenmessbereich einer hochauflösenden 3D Stereokamera nicht einfach über die Verkleinerung der Blende erhöhen, da sonst die nötige Bestrahlungsstärke auf dem Objekt stark erhöht werden muss und das generelle Auflösungsvermögen durch Beugungseffekte limitiert wird. Somit ergibt sich eine natürliche Konfiguration, bei welcher der Durchmesser der Blende so weit verringert wird, sodass der Durchmesser der ersten Beugungsordnung der Kantenlänge des einzelnen Pixel entspricht $\rightarrow r_a = l_{px}$.

Typische Systeme arbeiten im sichtbaren Wellenlängenbereich, daher wird hier die Wellenlänge von 730 nm angesetzt, welche den größten Radius der ersten Beugungsordnung zeigt ($r_A \lambda$). Die Kantenlänge der Sensorpixel beträgt beispielsweise $l_{px} = 10 \mu m$. Somit ergibt sich eine optimale Blende für $m \rightarrow 0$ von $k = 11$, bei welcher der Radius sich zu $r_a = 9.8 \mu m$ ergibt und somit das System gerade noch der Beugungsbegrenzung nach Gleichung 62 entgeht. Wird diese Bedingung vorausgesetzt und eine Variation des Maßstabes zugelassen, ergibt sich die Abhängigkeit der Blendenzahl von der optischen Vergrößerung zu:

$$k = \frac{11}{1 + m} \quad (63)$$

Der Zusammenhang der maßstabsabhängigen Blende (Gleichung 63) kann nun in Gleichung 61 eingesetzt werden und man erhält somit die maßstabsabhängige objektseitige Schärfentiefe, welche eine nicht beugungslimitierte Abbildung zulässt:

$$DOF_o(m) = \frac{22 \cdot l_{px}}{m^2 - \left(\frac{11 \cdot l_{px}}{f(1+m)} \right)^2} \quad (64)$$

Die Zusammenhänge von Gleichung 63 und 64 sind in Abbildung 64 grafisch dargestellt. Diese grundlegende Abhängigkeit des Abbildungsmaßstabes und der erreichbaren Schärfentiefe ist für diese Arbeit relevant, da eine messtechnische Applikation typischerweise über die optische Auflösung und den Höhenmessbereich spezifiziert wird. Da beide Parameter in einem optisch abbildenden System nicht unabhängig voneinander gewählt werden können, müssen diese in Abhängigkeit voneinander betrachtet werden. Als Grundregel sollte bei der Auslegung eines Systems darauf Wert gelegt werden, dass die optische Auflösung nicht höher als notwendig gewählt wird, da sonst der Höhenmessbereich zwangsweise limitiert wird.

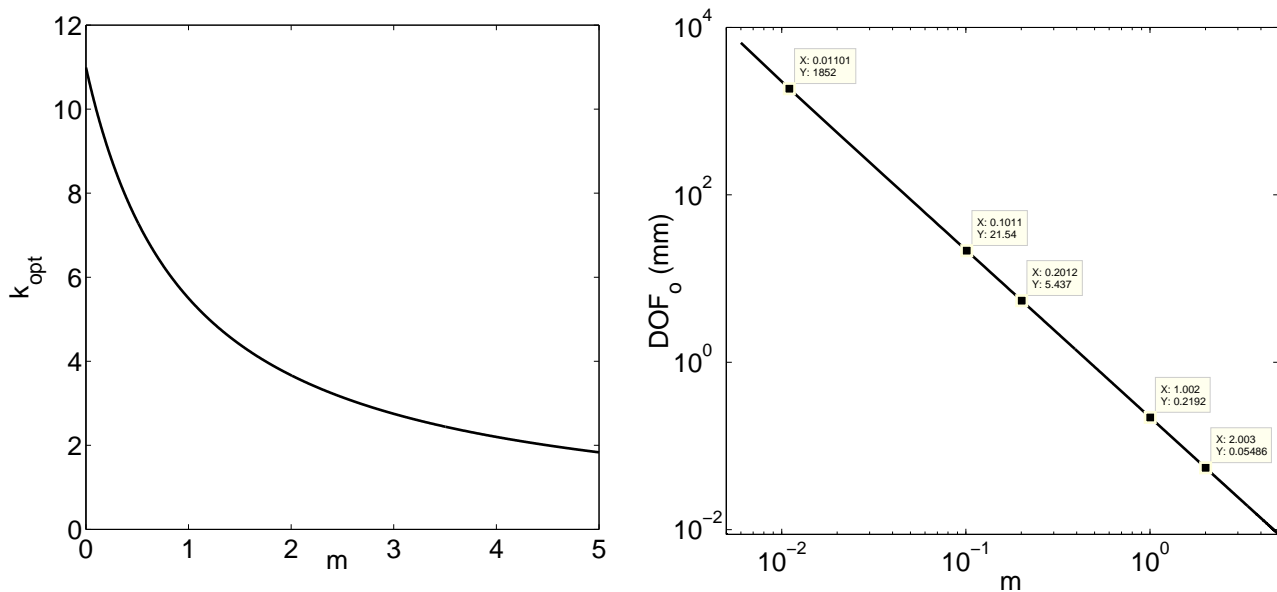


Abbildung 48: Auf der linken Seite ist die optimale Blendenzahl k_{opt} , bei welcher die optische Abbildung bei $l_{px} = 10 \mu\text{m}$ nicht beugungslimitiert ist, über den Abbildungsmaßstab m aufgetragen. Auf der rechten Seite ist doppelt logarithmisch die zugehörige objektseitige Schärfentiefe DOF_o in Abhängigkeit des Abbildungsmaßstabes m bei einer Brennweite von $f = 70 \text{ mm}$ zu sehen. Orientierend sind einige exemplarische Datenpunkte eingetragen.

In der Anwendung kann oft die Blende etwas weiter geschlossen werden als die bisherige Diskussion nahelegt, da die wenigsten Objektive derart optimal ausgelegt sind, dass die MTF bei der optimalen Blendenzahl nur durch die Beugung limitiert wird. Die Blende kann in der Praxis so weit verkleinert werden, bis die Effekte der Beugung in die gleiche Größenordnung gelangen, wie die MTF -Verluste durch das nicht perfekte optische Design und die Fertigungstoleranzen des Objektives. Diese optimale Blendeneinstellung kann entweder durch optische Simulationen oder durch vergleichende Messungen bestimmt werden, wobei in beiden Fällen unter Variation der Blende die MTF ausgewertet wird. Simulationen können beispielsweise in dem Simulationsprogramm *OpticStudio* der Firma *Zemax* durchgeführt werden.

Aus den erläuterten Zusammenhängen heraus lässt sich leicht verstehen, dass die Schärfentiefe eines optisch abbildenden Systems nicht einfach beliebig erhöht werden kann. Daher soll nun die Schärfentiefe in Abhängigkeit der Größe der Strukturen, welche auf dem erfassten Objekt auftreten, betrachtet werden. Die bisherige Diskussion beschränkt sich auf die Bedingung, dass das optisch abbildende System das Signal zweier benachbarter Pixel trennen kann. Nach dem Abtasttheorem kann bei einer diskreten Abtastung eines analogen Signals nur eine maximale Frequenz, namentlich die *Nyquistfrequenz* ν^{ny} , aufgelöst werden. Diese Frequenz entspricht einer Wellenlänge λ_b^{ny} des Bildsignals $B(x, y)$, wobei gerade

auf zwei benachbarte Abtastpunkte, also Sensorpixel, jeweils auf einen Hochpunkt und einen Tiefpunkt der Welle fallen. Im Falle eines bildgebenden Sensors bedeutet das:

$$\lambda_b^{ny} = 2 \cdot l_{px} \quad (65)$$

Diese minimale auflösbare sensorseitige Wellenlänge wird nun direkt über den Abbildungsmaßstab auf das Objekt übertragen:

$$\lambda_o^{ny} = \frac{\lambda_b^{ny}}{m} = \frac{2 \cdot l_{px}}{m} \quad (66)$$

Wie in Kapitel 2.3.5 betrachtet wurde, arbeiten (lokale) Algorithmen zur Rekonstruktion von Oberflächen-Topografien nicht auf Basis einzelner Pixel, sondern es werden zur Berechnung der Disparität D ganze Bereiche, bzw. Suchfenster herangezogen. Innerhalb dieser wird die Disparität beider Teilbilder durch beispielsweise die normierte, mittelwertsfreie Kreuzkorrelation berechnet. Diese Fenster haben eine zu definierende Größe l_F , welche typischerweise in dem Bereich von $l_F = 5 \dots 50px$ liegt. Durch die Fenstergröße ist eine maximale messbare Wellenlänge λ_o^{max} definiert. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass genau eine halbe Wellenlänge in dem betrachteten Fenster zu liegen kommt. Längere Wellenlängen wirken sich im Wesentlichen durch eine einfache Änderung des gesamten Signalmittelwertes aus und beinhalten somit keine Bildinformation, welche zur Messung der Disparität des betrachteten Fensters verwendet werden kann. Somit ergibt sich für die maximale beitragende Wellenlänge der Modulationen im Bild im Zusammenhang mit der Fenstergröße des Suchbereiches l_F :

$$\lambda_b^{max} = 2 \cdot l_F \quad (67)$$

Die in Kapitel 6 messtechnische Betrachtung zeigt, dass das in dieser Arbeit eingesetzte Korrelationsverfahren sehr robuste Ergebnisse liefert, wenn mindestens zwei volle Wellenlängen in einem Korrelationsfenster zu liegen kommen. Unterhalb von einer halben Wellenlänge pro Korrelationsfenster divergiert das Messrauschen (siehe Abbildung 59). Aus diesen Betrachtungen heraus wird motiviert, dass nicht nur die Schärfentiefe bei der kleinsten messbaren Modulation λ_b^{ny} bewertet wird (wie bisher diskutiert), sondern in einem gesamten Wellenlängenbereich der innerhalb eines betrachteten Messfensters auftretenden Modulationen $\Delta\lambda_b = \lambda_b^{ny} \dots \lambda_o^{max}$. Es wird hierzu in Gleichung 61 die fest definierte Kantenlänge des einzelnen Pixels, welche dem Streukreis entspricht $u = l_{px} = \lambda_b^{ny}/2$, durch eine variable Wellenlänge der auf dem Objekt auftretenden Kontrastmodulationen $u = \lambda_b/2 = m \cdot \lambda_o/2$ ersetzt:

$$DOF_o(\lambda_o) = \frac{\lambda_o \cdot k(1/m + 1)}{m^2 \left(1 - \left(\frac{\lambda_o \cdot k}{2 \cdot f} \right)^2 \right)} \quad (68)$$

und man erhält somit eine Beschreibung der wellenlängenabhängigen Schärfentiefe $DOF_o(\lambda_o)$. Exemplarisch wurde für eine Kamera nach Gleichung 68 die wellenlängenabhängige Schärfentiefe in Abbildung 49 aufgetragen. Direkt ersichtlich ist, dass die Schärfentiefe in guter Näherung proportional zur betrachteten Modulationswellenlänge λ_o steigt. Sollten nun auf einem betreffenden Objekt Modulationen mit einer Wellenlänge von $\lambda_o^{dom} = 3 \cdot \lambda_o^{ny}$ dominieren, bedeutet das direkt auch eine Verdreifachung des effektiv nutzbaren Höhenmessbereichs. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass zur Bestimmung des nutzbaren Höhenmessbereichs $\Delta\lambda_{o,max}$ nicht nur das optische System selbst relevant ist, sondern außerdem die auftretenden Modulationen auf dem zu analysierenden Objekt. Weiterhin spielt ebenfalls die Parametrisierung der Algorithmen (die Fenstergröße l_F) eine wichtige Rolle.

Nun kann berechtigterweise die Frage gestellt werden, warum nicht einfach die Auflösung des Kamerasystems reduziert wird. Auf diesem Wege könnte auch eine größere Schärfentiefe erzielt werden und zusätzlich wird bei konstanter Anzahl von Pixeln die Abtastbreite erhöht. Es hat sich gezeigt, dass auf einem zu vermessenden Objekt unterschiedliche Oberflächenstrukturen auftreten können, die auf

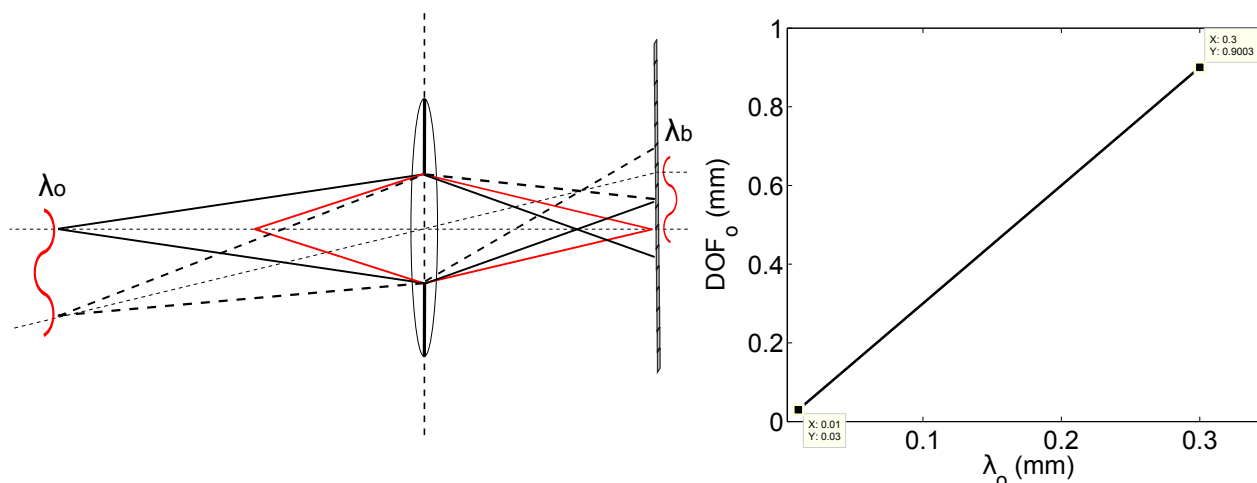


Abbildung 49: Links ist geometrisch illustriert wie sich der Zerstreuungskreis bei ausgedehnten Objekten über mehrere Pixel erstrecken kann und weiterhin das Objekt auf dem Sensor aufgelöst wird. Auf der rechten Seite ist der Zusammenhang der Gleichung 68 $DOF_o(\lambda_o)$ aufgetragen. Es wurden beispielhaft die Parameter $k = 8$, $m = 2$, $f = 70$ mm, $\lambda_o = 0.01 \dots 0.3$ mm betrachtet. Diese Konfiguration entspricht dem System, welches in Kapitel 6 messtechnisch untersucht wird.

verschiedenen Höhen zueinander liegen. Bei ersten Analysen hat sich heraus gestellt, dass diese spezielle Applikation mit einem hochauflösenden Kamerasystem nicht behandelt werden kann. Jedoch können bei einer optimierten Positionierung des Objektes im Höhenmessbereich robuste Ergebnisse erzielt werden, indem die Bereiche des betreffenden Objektes mit hochfrequenten Strukturen in die optimale Fokusebene bei o_0 des Systems gebracht werden. Zusätzlich kann durch das gezielte Aufbringen niederfrequenter Strukturen auf dem Objektträger eine Referenz hergestellt werden, welche weit außerhalb der konventionellen Schärfentiefe vermessen werden kann. Somit kann durch eine Verallgemeinerung des Verständnisses der Schärfentiefe applikationsspezifisch der Einsatzbereich insbesondere hochauflösender Kamerasysteme stark erweitert werden.

6.2 Experimenteller Aufbau

Die im Folgenden behandelten Messdaten wurden mit einem System aufgenommen, welches es ermöglicht, die Position der zu vermessenden Referenzebene in zwei Richtungen präzise motorisch zu verfahren. Wie in Abbildung 50 dargestellt ist, wird die Referenzebene mit zwei hochpräzisen Linearachsen des Typs *LTM* der Firma *Owis* positioniert. Eine ermöglicht die zeilenweise Erfassung des Objektes durch Transport in die *y*-Richtung. Die andere Achse ermöglicht es den Abstand zwischen der Kamera (CP000520-D02-005-0035) und der Referenzebene, also die Objektweite o , kontrolliert zu variieren. Bei den folgenden Auswertungen wird die Änderung der Objektweite auf die Ebene des idealen Fokus o_0 bezogen. Angegeben wird somit $\Delta o = o - o_0$. Zur Beleuchtung der Referenzebene wird die Tunnelbeleuchtung CP000200-340T der *Chromasens GmbH* eingesetzt. Die Tunnelbeleuchtung gewährleistet eine möglichst homogene Ausleuchtung der Referenzebene aus einem sehr großen Raumwinkelbereich. Durch diese Beleuchtungsgeometrie können insbesondere die Messung störende lokale Signalüberhöhungen effektiv unterdrückt werden.

Die Wiederholgenauigkeit der Linearachsen wurde mittels mechanischer Feinmessuhren mit einer Ablesegenauigkeit von $\pm 1 \mu\text{m}$ geprüft. Die Wiederholgenauigkeit liegt unterhalb der Messgenauigkeit der Feinmessuhr und konnte somit hier nicht absolut bestimmt werden. Bei den Analysen der Messungen des Messrauschens muss daher mit in Betracht gezogen werden, dass Messfehler in der Größenordnung

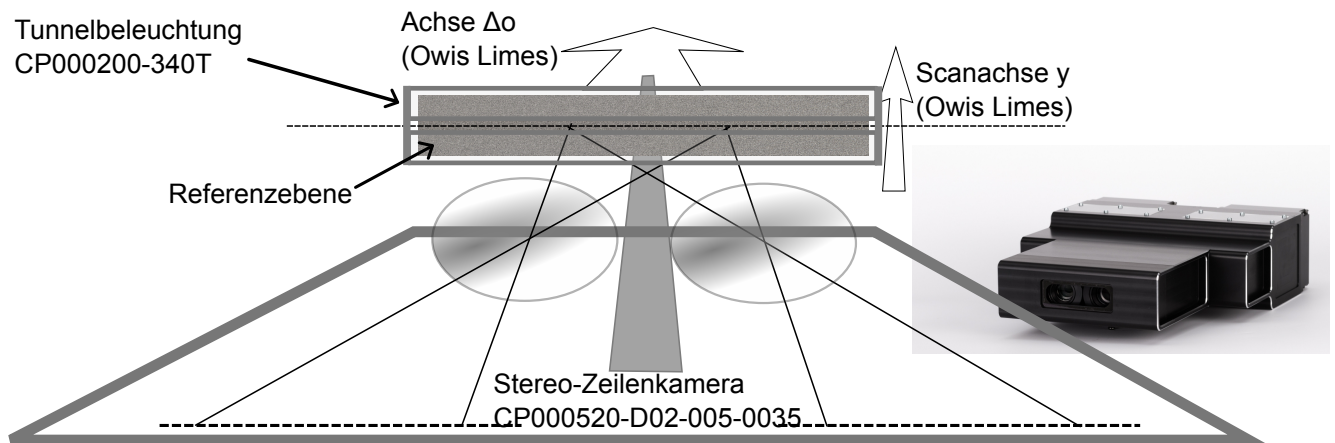


Abbildung 50: Dargestellt ist der Aufbau zur Messdatenaufnahme im Rahmen der Charakterisierung der hochauflösenden Stereo-Zeilenkamera (CP000520-D02-005-0035). Die Referenzebene kann mittels zweier hoch präzisen Linearachsen (*Owis LTM*) in zwei Raumrichtungen verschoben werden. Einerseits ermöglicht eine vertikale Achse in y-Richtung die zeilenweise Erfassung der Referenzebene. Eine zweite Linearachse ermöglicht es den Abstand der Referenzebene zur Kamera zu verändern. Relative Änderungen der Objektweite werden mit $o - o_0 = \Delta o$ bezeichnet. Die Referenzebene wird mit einem Tunnellicht (CP000200-340T) beleuchtet, um möglichst eine homogene Ausleuchtung zu erhalten.

von $1\ \mu\text{m}$ durch den experimentellen Aufbau verursacht werden können und somit hier als Limit für die Genauigkeit der Charakterisierung der Kamera angenommen werden müssen.

Weiterhin wird der experimentelle Aufbau ca. 2 Stunden vor jeder Messreihe in Betrieb genommen, um sicherzustellen, dass sich dieser zu Beginn der Messung in einem thermisch stabilen Zustand befindet.

6.3 Bestimmung der Änderung der MTF mittels Fouriertransformation

Zur Qualitätssicherung im Produktionsprozess der Kameras wird bei einer definierten Frequenz der erzielte Kontrast im Bild vermessen. Hierbei muss die Frequenz so hoch wie möglich gewählt werden, da bautechnische Toleranzen der Objektive sowie die Justagetoleranzen des Sensors insbesondere bei hohen Frequenzen zu Reduktionen der *MTF* führen, also die Wirkung eines Tiefpasses aufweisen. Andererseits muss bei der Betrachtung einer statischen Modulation mit fester Phasenlage relativ zum Pixelraster darauf geachtet werden, dass die Frequenz nicht höher als die halbe Nyquistfrequenz gewählt wird. Sonst führt eine Phasenverschiebung der Bildinhalte relativ zum Pixelraster zu starken Variationen der *MTF*-Messung. Die Ursache dieser sogenannten Schwebungen liegt in der Unterabtastung des analogen Signals, wodurch eine starke Abhängigkeit von der Phasenlage zwischen dem Pixelraster und der Modulation des Prüfobjektes entsteht. Daher werden die robustesten Ergebnisse bei einer Testfrequenz bei der halben Nyquistfrequenz erhalten. Die Bewertung der Übertragungsfunktion bei einer festen Frequenz weist den bedeutenden Vorteil auf, dass diese Messung in Echtzeit ausgewertet werden kann und somit die Justage der Sensoren mit einer weitestgehend latenzfreien Wertermittlung durch einen Monteur intuitiv durchgeführt werden kann.

Absolute Messungen der *MTF* können beispielsweise über den standardisierten QA62-Referenzbeleg durchgeführt werden [Burns, 2000, 2015]. Hierbei wird ausgenutzt, dass die Fouriertransformation einer idealen Stufenfunktion alle Frequenzen beinhaltet. Das Problem, dass die Messung einer fallenden oder steigenden Flanke von der relativen Phasenlage des Abtastrasters zum Signal abhängt wird umgangen, indem eine schräge Kante erfasst wird. Somit wird praktisch eine Mehrfachmessung mit einer kontinu-

ierlich variierenden Phasenlage der Signalkante durchgeführt, um über einen großen Frequenzbereich eine robuste Messung der optischen Filterfunktion zu erhalten. QA62 Testbelege sind allerdings für gewöhnliche in der Dokumentenerfassung und der Fotografie vorkommende optische Auflösungen von ca. 100 – 300 dpi ausgelegt. Bei dem hier vornehmlich behandelten System mit einer optischen Auflösung von 5080 dpi zeigen sich bei der Verwendung dieser Belege deutliche messtechnische Probleme, da bei dieser hohen optischen Auflösung die Kontrastkante des Testbeleges nicht mehr als ideal angenommen werden kann. Somit ist die Messung der *MTF* verfälscht durch die endliche Steilheit der Flanke.

Qualitativ hochwertige Objektive, wie sie im industriellen Umfeld eingesetzt werden, zeigen geringe Toleranzen hinsichtlich der Abbildungsleistungen. Warenausgangskontrollen und robuste Fertigungsverfahren der Hersteller machen hier ausführliche Tests weitestgehend obsolet. Jedoch ist es im Zusammenhang mit den 3D Kameras relevant, den räumlichen Überlapp der Bildfelder im Detail zu verstehen und zu analysieren. Zu diesem Zweck wurde hier eine Umgebung zur Vermessung der räumlichen Änderung der frequenzabhängigen *MTF* konzeptionell entworfen und realisiert. Ein wesentlicher Teil liegt in der Auslegung der objektseitigen Anregung. Diese wird hier als stochastisches Muster realisiert, welches eine möglichst hohe Bandbreite von Frequenzen abdeckt, welche zur Bewertung der Optik benötigt wird. Alternativ können definierte sinusförmige Kontrastmuster erzeugt werden, wobei hier auch die Schwierigkeit in der Abhängigkeit der Messung von der Phasenlage zwischen dem Pixelraster und dem Objekt liegt. Diese Probleme können einfach umgangen werden, indem alle Frequenzen mit einer zufälligen Phasenverteilung überlagert werden, was einem normal verteilten Rauschen der Kontrastfunktion entspricht.

In Abbildung 51 ist das grundlegende Prinzip dargestellt. Oben ist ein mit der Kamera erfasstes Rauschmuster zu sehen, darunter ein vergrößerter Auszug, der einen Eindruck der mikroskopischen Struktur vermittelt. Rechts daneben ist als Graf eine horizontale Zeile des Signals des Grünkanals des Bildes über die Sensorposition aufgetragen (Profilschnitt durch die Kontrastfunktion des Bildes). Rechts daneben ist die korrespondierende diskrete Fouriertransformierte des Signals aufgetragen.

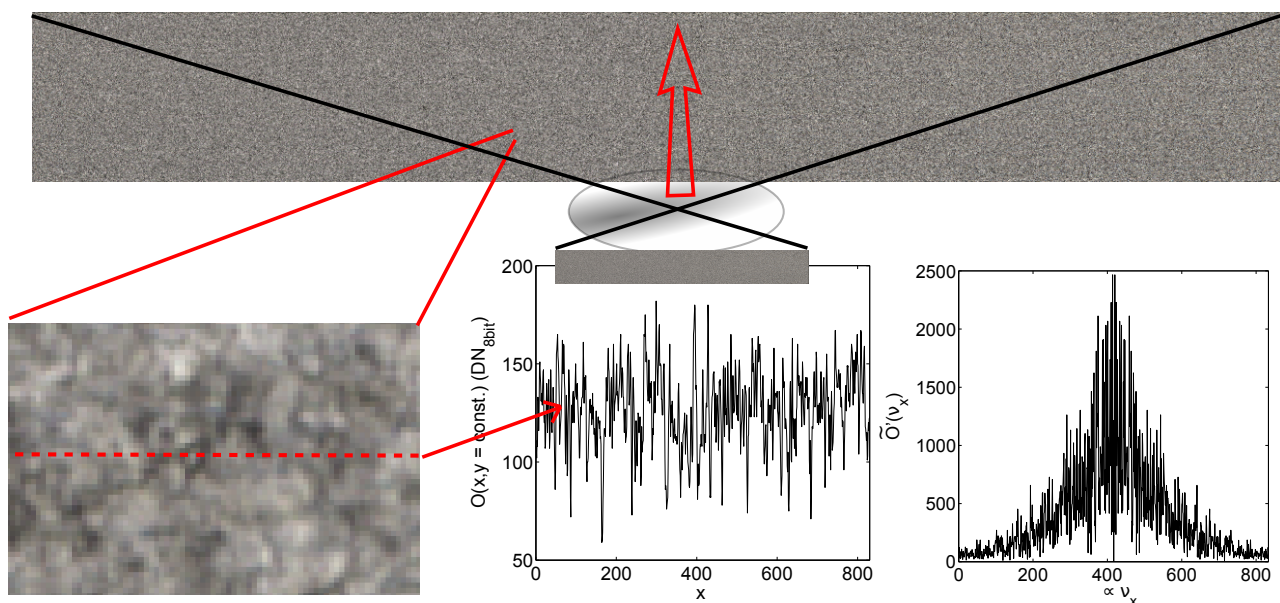


Abbildung 51: Oben ist das Bild des Rauschmusters der Referenzebene zu sehen, erfasst mit einer Auflösung von $5\mu m/Px$ (Kameratyp CP000520-D02-005-0035). Darunter ist ein vergrößerter Ausschnitt dargestellt. Hier ist die mikroskopische Struktur der Objektoberfläche erkennbar. Daneben ist als Graf das Signal einer horizontalen Pixelreihe des Grünkanals über den Ort aufgetragen. Rechts daneben ist der Absolutwert der diskreten Fouriertransformation des Signals aufgetragen. Der Pfeil deutet die Transportrichtung des Objektes an.

Bei der Behandlung der diskreten Fouriertransformation muss auf die korrekte Normierung der Amplitude und der Frequenzachse geachtet werden. Insbesondere, da die Ergebnisse bei einer geraden und einer ungeraden Anzahl von Datenpunkten in Abhängigkeit von der Implementierung unterschiedlich behandelt werden müssen. Bei einer geraden Anzahl von Datenpunkten treten die Amplitude der Nyquistfrequenz ν_{ny} und die Amplitude bei der Frequenz $\nu_{ny} = 0$ nur einfach auf, bei einer ungeraden Anzahl von Datenpunkten hingegen tritt nur der konstante Anteil einfach auf. Das muss bei der Ableitung des einseitigen Spektrums beachtet werden, da der gesamte Amplitudenbeitrag bei den doppelt auftretenden Frequenzen auf beide Anteile symmetrisch verteilt ist. Bei der Normierung der Amplitude muss die genaue Definition der Implementierung der DFT (Diskrete Fouriertransformation) berücksichtigt werden. Im konkreten Fall von *Matlab* muss durch die Anzahl der Datenpunkte N dividiert werden.

Neben der korrekten Amplitude des Signals muss die Wellenlängen- bzw. die Frequenzachse korrekt definiert werden. Bei der diskreten Fouriertransformierten ist die Frequenzauflösung durch die Anzahl der Datenpunkte N_x und N_y gegeben, die maximale messbare (Nyquist-)Frequenz ν_{ny} durch die Abtastfrequenz ν_s . Im konkreten Fall der Behandlung von Bilddaten korrespondiert die Abtastfrequenz mit der optischen Auflösung. Die hier betrachtete Kamera weist eine Auflösung von $Res = 5 \mu\text{m}/\text{Px}$ auf, was somit einer Abtastfrequenz von $\nu_s = 1/Res = 200 \text{ mm}^{-1}$ und der Nyquistfrequenz $\nu_{ny} = \nu_s/2 = 100 \text{ mm}^{-1}$ entspricht. Die eingesetzte Referenzebene des Objektes mit dem aufgetragenen Rauschmuster ist 5 mm breit, verwendet werden für die Analyse ca. 4 mm der Stufe, was einer Bildhöhe von $N_y = 800$ Pixeln gleich kommt. Daraus ergibt sich die Frequenzauflösung von $\Delta\nu_o = \nu_{ny}/(N/2 + 1) \approx 0.5 \text{ mm}^{-1}$. Die Wellenlängenachse ergibt sich als Kehrwert aus der linearen Frequenzachse $\lambda_{o,i} = 1/\nu_{o,i}$ und ist somit allgemein nicht gleichabständig. Trotzdem werden im Folgenden häufig frequenzabhängige Daten über die Wellenlänge aufgetragen, um eine intuitive Interpretation der Abhängigkeiten zu erleichtern.

Um die absolute *MTF* der abbildenden Optik aus den beschriebenen Ansätzen ableiten zu können, müsste die ungefilterte Modulation des erfassten Objektes, also die genaue Kontrastfunktion $O(x, y)$, auf dem Objekt bekannt sein. Da es sich hierbei im Wesentlichen um eine gezielt aufgerauhte metallische Oberfläche handelt, ist die Bestimmung der genauen Kontrastmodulation nur sehr schwierig möglich. Zusätzlich ist der Kontrast abhängig von der Beleuchtungsgeometrie, was eine absolute, allgemeingültige Bestimmung von $O(x, y)$ stark erschwert. Daher wird die absolute *MTF* nur bei einer definierten Frequenz bei der Montage der Kamera gemessen. Frequenzabhängig wird im Folgenden die relative Änderung der *MTF* unter Variation der Objektweite o betrachtet. Hierzu wird die Fouriertransformierte in der optimal fokussierten Ebene, also bei o_0 , als Referenz verwendet. Betrachtet werden hierzu relative Änderungen der *MTF* unter Veränderung des Abstandes zwischen der Kamera und dem Objekt. Außerdem werden die Änderungen entlang der Sensorzeile untersucht. Des Weiteren werden die sagittale und die meridionale Komponente der *MTF* getrennt voneinander bewertet, indem die Fouriertransformierte jeder Bildzeile und jeder Bildspalte getrennt voneinander berechnet wird. Um das Signalrauschen der *MTF*-Messung zu minimieren, werden alle Spalten, bzw. Reihen über das betrachtete ROI gemittelt. In Abbildung 52 ist der Referenzdatensatz dargestellt. Hier wird um den optimalen Arbeitsabstand der Kamera o_0 mit einer Schrittweite von $\delta(\Delta o) = 100 \mu\text{m}$ die Objektweite o variiert. Auf der linken Seite sind die Daten der ersten Teilkamera dargestellt, auf der rechten Seite entsprechend die der zweiten. Oben ist die sagittale Komponente, unten der meridionale Anteil der *MTF* aufgetragen. Direkt ersichtlich ist, dass insgesamt das Signal zu höheren Frequenzen hin abnimmt. Der konstante Anteil, also entsprechend das mittlere Signal, wird vor der Berechnung der diskreten Fouriertransformation abgezogen, da das mittlere Signal hier nicht von Interesse ist. Trotzdem zeigt sich, dass die Signalamplitude bei geringen Frequenzen die Messung dominiert. Daraus darf allerdings nicht abgeleitet werden,

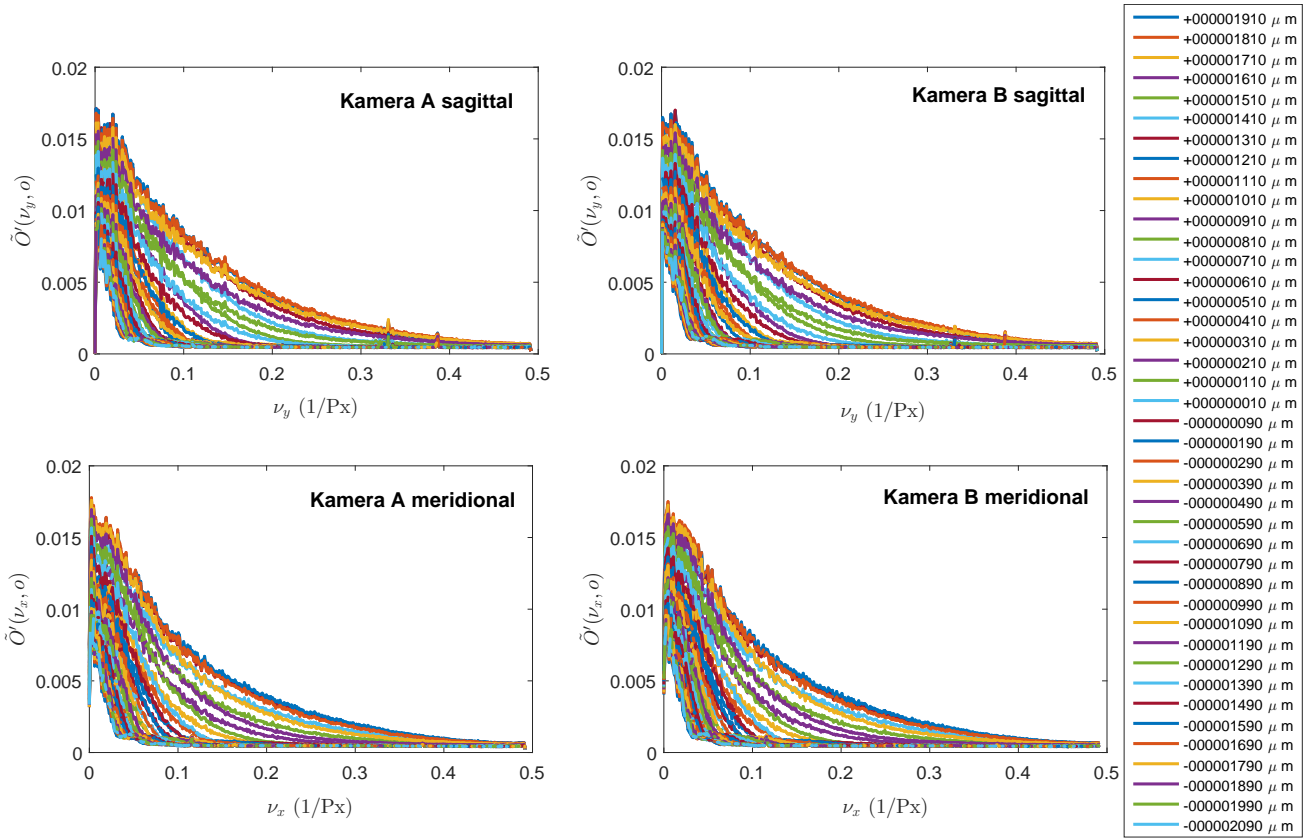


Abbildung 52: Aufgetragen sind für verschiedene Objektweiten o die meridionale und die sagittale Komponente der Amplitude der diskreten Fouriertransformierten des Bildsignals gemessen auf dem Rauschmuster. Die Legende beschreibt die Änderung der Objektweite $\Delta o = o - o_0$. Auf der linken Seite sind die Daten der ersten Teilkamera, auf der rechten Seite die Daten der zweiten Teilkamera zu sehen. Der Abstand zwischen der Kamera und dem Objekt o wird in Schritten von $\delta(\Delta o) = 100 \mu\text{m}$ variiert. Ersichtlich ist, dass bei hohen Frequenzen die gemessene Amplitude stark abfällt, was durch das Referenzmuster und die Optik bestimmt wird.

dass hier direkt die Filterwirkung der abbildenden Optik gemessen wird, da in der Amplitude noch die Frequenzverteilung des Rauschmusters enthalten ist. Es gilt für das gemessene Signal $\tilde{O}'(\nu)$:

$$\begin{aligned}
 \tilde{O}'(\nu_x, \nu_y, o) &= |f f t(O'(x, y, o))| = |f f t(O(x, y) * p_o(x, y, o))| \\
 &= |f f t(O(x, y))| \cdot |f f t(p_o(x, y, o))| \\
 &= |\tilde{O}(\nu_x, \nu_y)| \cdot MTF(\nu_x, \nu_y, o)
 \end{aligned} \tag{69}$$

Wobei hier $O'(\nu_x, \nu_y, o)$ das gemessene Bildsignal ist, welches bestimmt ist durch die Kontrastfunktion der Objektoberfläche $O(x, y)$, welche mit dem Tiefpassfilter $p_o(x, y)$ der Optik gefaltet ist. Somit ist \tilde{O}' bestimmt durch die MTF und die Kontrastfunktion der Objektoberfläche. Wird eine relative Änderung der gemessenen frequenzabhängigen Amplitude \tilde{O}' betrachtet, lässt sich die Änderung der MTF einfach ableiten:

$$\tilde{O}'(\nu_x, \nu_y, o) / \tilde{O}'(\nu_x, \nu_y, o') = MTF(\nu_x, \nu_y, o) / MTF(\nu_x, \nu_y, o') \tag{70}$$

Diese Daten können direkt aus den Datensätzen von Abbildung 69 abgeleitet werden. Zur korrekten Normierung der Frequenzachsen der einzelnen Datensätzen untereinander, wird die Maßstabsänderung

in Abhängigkeit von der geänderten Objektweite $m(o)$ mit berücksichtigt. Der Abbildungsmaßstab in der Sollebene o_0 ist $m_0 = b/o_0$. Da sich die Bildweite über die Messreihe nicht ändert, kann abgeleitet werden, dass sich der Maßstab linear mit der Objektweite ändert:

$$m(\Delta o) = m_0 \cdot \frac{o_0}{o_0 + \delta o} \quad (71)$$

Auf der Basis von Gleichung 71 werden die Frequenzachsen der einzelnen Messungen auf den Datensatz mit der geringsten Auflösung bei Δo_{max} skaliert. Die Resultate der relativen Änderung der MTF sind in Abbildung 53 dargestellt. Normiert wird hier die Amplitude jeweils auf den Datensatz, bei welchem die sagittale MTF in der Bildmitte das Maximum zeigt. Daher sind alle relativen MTF Verläufe in den unteren Grafen kleiner eins, wobei die meridionale Komponenten ihr Maximum bei einer anderen Objektweite zeigt, wodurch hier ein Signal größer als eins zu Stande kommt. Der Zusammenhang ist über den Astigmatismus des Objektivs zu erklären. Die beiden Raumrichtungen der MTF zeigen aufgrund des Astigmatismus ihr Maximum zu verschiedenen Objektweiten $o = o_0 + \Delta o$.

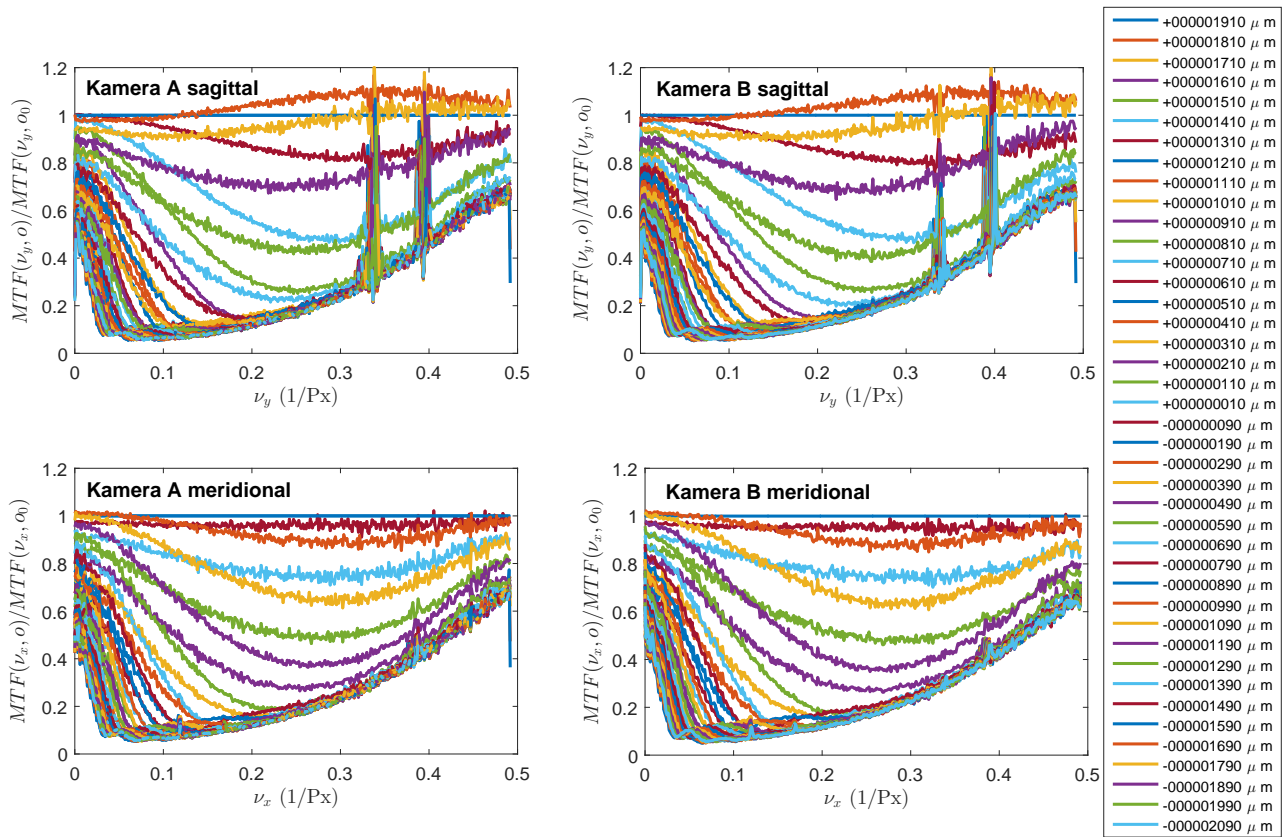


Abbildung 53: Dargestellt ist die gemessene relative Änderung der MTF entsprechend Gleichung 70 aufgetragen über die Frequenz ν . Links und rechts sind die beiden Teilkameras dargestellt, oben ist die meridionale Komponente zu sehen, darunter die sagittale. Normiert wird jeweils auf den Datensatz der Objektweite, in welcher die sagittale Komponente der MTF das Maximum zeigt. Ersichtlich ist, dass die MTF unter Variation der Objektweite o bei hohen Frequenzen schneller abfällt, da die Schärfentiefe mit steigender Frequenz ν abnimmt. Die starken Signalüberhöhungen zwischen $\nu_y = 0.3...0.4 \text{ Px}^{-1}$ sind wahrscheinlich durch eine nicht perfekte Synchronisation zwischen der Kamera und dem Transport gegeben.

Bei einer kleinen Veränderung der Objektweite werden als erstes die hohen Frequenzen im Signal reduziert, was über den anwachsenden Zerstreuungskreis durch die auftretende Unschärfe erklärt werden

kann. Die niedrigen Frequenzen werden somit erst durch die eintretende Defokussierung beeinflusst, wenn der Zerstreuungskreis eine Tiefpasswirkung bei der entsprechenden Modulation auf dem Objekt verursacht.

Auffallend ist bei den Daten, dass insbesondere bei den hohen Frequenzen das Signal selbst bei großen Änderungen der Objektweite nicht bis auf Null abfällt. Intuitiv wird erwartet, dass bei fortschreitender Defokussierung die gemessene Modulation stetig zu Null abfällt. Weitergehende Untersuchungen haben gezeigt, dass das verbleibende Signal bei hohen Frequenzen mit der Beugungslimitierung durch die Blende in Zusammenhang gebracht werden kann. Die Beugung an der Kreisblende verursacht eine Modulation im Bild, welche nicht abhängig von der Defokussierung ist, da dieser Anteil keinerlei Informationen über das Objekt enthält. Somit kann in diesem Messverfahren sehr eindrücklich die Beugungslimitierung gemessen werden. Wird der Blendendurchmesser vergrößert, verringert sich das verbleibende Restsignal. Allerdings fällt das Signal insgesamt schneller ab, da durch den vergrößerten Raumwinkel der Strahlenbündel die Schärfentiefe reduziert wird.

Auffällig sind im Falle der sagittalen Komponente der MTF die zwei starken Signalüberhöhungen zwischen $\nu = 0.3...0.4 \text{ Px}^{-1}$ (siehe Abbildung 53 oben). Der Effekt kann damit erklärt werden, dass die Synchronisation zwischen dem Transport des Rauschmusters und der Zeilenausgabe der Kamera nicht ideal ist. Die Vibrationen der Linearachse können beispielsweise die Ursache sein, dass an diesen beiden Stellen eine Signalüberhöhung auftritt, deren Frequenz von Bildaufnahme zu Bildaufnahme eine leichte Verschiebung aufweisen kann. Solch eine minimale Frequenzverschiebung könnte bei der Normierung der Messdaten nach Gleichung 70 zu den starken Überhöhungen führen.

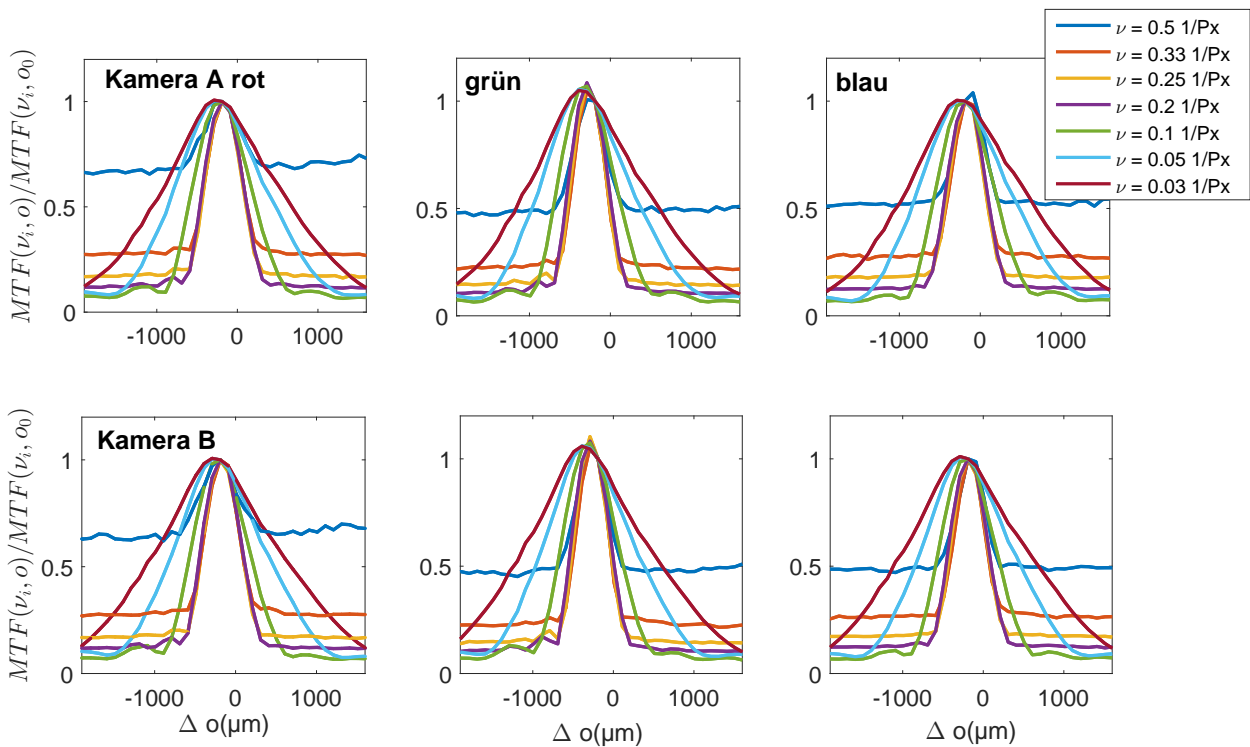


Abbildung 54: Ausgehend von den Daten aus Abbildung 53 wird hier bei konstanter Frequenz ν_x die Änderung der MTF über die Änderung der Objektweite Δo aufgetragen. Die Halbwidthenbreite der einzelnen Kurven steigt mit fallender Frequenz ν . Die Halbwidthenbreite kann somit als Maß für die Schärfentiefe verwendet werden. Die hohen Frequenzen zeigen die Beugungslimitierung durch das verbleibende Restsignal. Vergleichende Experimente unter Variation der Blende haben gezeigt, dass das Restsignal mit steigendem Durchmesser der optischen Apertur gegen null fällt.

Die relative Änderung der MTF kann weitergehend analysiert werden, wenn bei diskreten Frequenzen $\nu_{x,y}$ die Daten über die Objektweite aufgetragen werden. Diese Darstellung wurde in Abbildung 54 gewählt. Hier ist durch die Halbwertsbreite der einzelnen aufgetragenen Änderungen der MTF bei konstanter Frequenz ersichtlich, dass sich die Schärfentiefe wie erwartet mit fallender Frequenz erhöht. Der betrachtete Frequenzbereich wird hierbei so gewählt, dass der für die Korrelation relevante Bereich abgedeckt wird. Entsprechend der Ergebnisse, welche in Abbildung 59 dargestellt sind, wird hier die minimale Frequenz entsprechend dem Kehrwert der typischerweise maximalen Korrelationsfenstergröße gewählt. Korrelationsfenstergrößen im Bereich von $l_F = 5 \dots 30$ Px werden typischerweise eingesetzt. Kleinere Fenster zeigen eine zu hohe Anzahl an Fehlmessungen, da der Informationsgehalt hier zu gering ausfällt und somit die Anzahl der falsch gefundenen Korrespondenzen stark ansteigt. Korrelationsfenster jenseits von 30 Pixeln Kantenlänge zeigen eine zu starke Tiefpasswirkung auf das Höhenprofil, da für die Bestimmung eines einzelnen Datenpunktes eine zu große Umgebung mit in Betracht gezogen wird.

Angelehnt an diesen Überlegungen wird die geringste Frequenz entsprechend der Wellenlänge gewählt, welche dem größten Korrelationsfenster von 30 Pixeln entspricht $\nu^{min} = 1/\lambda^{max} = 1/l_F^{max} \approx 0.03$ 1/Px. Hierbei werden Ergebnisse von folgenden Untersuchungen in Betracht gezogen, wobei die erzielte Genauigkeit der Korrelation in Abhängigkeit vom Verhältnis der Wellenlänge der typische auftretenden Objektmodulationen zur Korrelationsfenstergröße betrachtet wird (siehe Abbildung 59). Bei dieser Untersuchung hat sich gezeigt, dass das Messrauschen stark ansteigt, wenn die dominierende Modulationswellenlänge unterhalb der Korrelationsfenstergröße liegt.

Die Datensätze, welche in Abbildung 54 dargestellt sind, wurden zur weiteren Analyse durch Gaußschen Normalverteilungen angenähert.

$$MTF(\nu_i, o)/MTF(\nu_i, o_0) \approx C \cdot \frac{1}{DOF_o^\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{o - \Delta o_0}{DOF_o^\sigma} \right)^2} \quad (72)$$

Somit kann die Lage des Maximums der MTF robust über das Maximum der Gaußschen Normalverteilungen Δo_0 bestimmt werden. Als Maß für die Schärfentiefe wird die Standardabweichung der Gaußschen Normalverteilungen DOF_o^σ verwendet.

Die jeweilige erhaltene Standardabweichung DOF_o^σ , welche die Breite der Kurve widerspiegelt, sowie die Lage des Maximums Δo_0 , können nun in Abhängigkeit der Farbkanäle und von der Sensorposition ausgewertet werden. Weiterhin kann die Auswertung auf die einzelnen Frequenzen angewendet werden. Nach Gleichung 68 und der daraus abgeleiteten Grafik 49 wird in Abhängigkeit der Wellenlänge ein lineares Verhalten der Schärfentiefe erwartet.

Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 55 zu sehen. Es ist ersichtlich, dass entsprechend der Gleichung 68 die Schärfentiefe in guter Näherung ein lineares Verhalten zur betrachteten Wellenlänge der Objektmodulation λ zeigt. Somit konnte eindeutig gezeigt werden, dass insbesondere der Ansatz einer Frequenz- beziehungsweise einer wellenlängenabhängigen Schärfentiefe angewendet werden kann. Der Höhenmessbereich kann somit einem Vielfachen der nominalen Schärfentiefe der Kamera entsprechen, da sinnvollerweise die Schärfentiefe zu einer gegebenen Frequenz definiert werden muss. Über die hier dargestellten Zusammenhänge kann für eine hochauflösende 3D Stereo-Zeilenkamera über die wellenlängenabhängige Schärfentiefe der Höhenmessbereich in Abhängigkeit von dem eingesetzten Korrelationsfenster definiert werden.

Die Daten in Abbildung 54 wurden jeweils in der Bildmitte auf dem Grünkanal erfasst. Weitere Aussagen über die Abbildungsleistung des Systems über das Messvolumen lassen sich treffen, wenn die Auswertung auf die Farbkanäle und die Sensorposition erweitert wird. Diese Abhängigkeiten werden im Folgenden behandelt.

6.4 Farblängsfehler, Bildfeldwölbung und Astigmatismus

Der Farblängsfehler ist bestimmt durch die wellenlängenabhängige Brechkraft der in den Optiken eingesetzten Gläser. Die Wellenlängenabhängigkeit des optischen Brechungsindex $n(\lambda)$ wird auch als optische

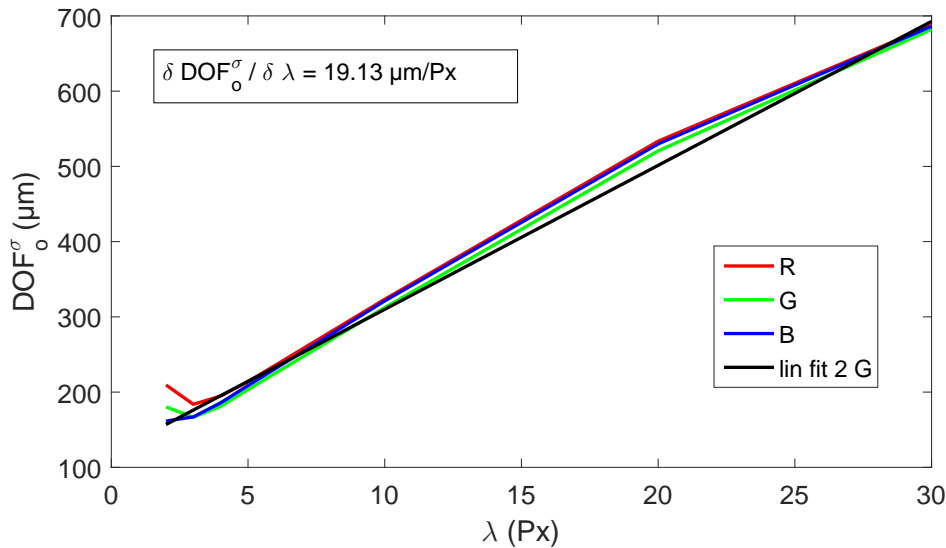


Abbildung 55: Aufgetragen ist über die Wellenlänge der Modulation die aus der Näherung mittels einer Gaußschen Normalverteilung (siehe Gleichung 72) erhaltenen Standardabweichung DOF_0^σ , welche hier als Maß für die Schärfentiefe verwendet wird. Schwarz ist eine lineare Näherung eingezeichnet. Klar ersichtlich ist das lineare Verhalten der Schärfentiefe zu Wellenlänge der Kontrastmodulation auf dem Objekt, wie nach Gleichung 68 erwartet wird.

Dispersion bezeichnet. Durch den Einsatz verschiedener Glassorten in einem Objektiv wird versucht, die Abweichungen der Brechungsindizes zu kompensieren. Allerdings gelingt das meist nicht vollständig, oder zumindest nicht über das gesamte Bildfeld hinweg. Die Auswirkung zeigt sich darin, dass die drei Farbauszüge des Bildes nicht in der selben Ebene ihre jeweilige maximale MTF zeigen. Somit können nicht alle Farbkanäle gleichzeitig mit der selben MTF auf einen ebenen Sensor abgebildet werden. Da typischerweise alle drei Farbkanäle zur Korrelation eingesetzt werden, ist es notwendig, die Abweichung der MTF über die Farbkanäle hinweg zu bewerten.

Ein weiterer Abbildungsfehler liegt in der Tatsache begründet, dass die meisten optisch abbildenden Systeme eine ebene Objektoberfläche nicht auf eine Ebene abbilden, sondern auf eine mehr oder weniger stark gekrümmte Oberfläche. Aus dieser Betrachtungsweise heraus ist auch zu verstehen, dass typische MTF Kennlinien hin zum Rand des Bildfeldes abfallen (siehe Abbildung 18). Dieser Effekt wird im allgemeinen durch eine zum Biltrand hin stärker auftretende Bildfeldwölbung (siehe Abbildung 20) hervorgerufen. Ein ebener Sensor kann daher nicht über das gesamte Bildfeld hinweg in die optimale Bildebene positioniert werden.

In Abbildung 56 wurde entsprechend der im vorangegangenen Kapitel durchgeführten Analysen gearbeitet, wobei nun die Änderung der MTF bei konstanter Modulationswellenlänge $\lambda_x = \lambda_y = 4 \text{ px}$ über die Sensorposition hinweg und für die einzelnen Farbauszüge getrennt voneinander bewertet werden. Zusätzlich werden die sagittale und die meridionale Komponenten separat ausgewertet und dargestellt. Aufgetragen wird in Abbildung 56 die Lage des Maximums der MTF Δo_0 , welche jeweils durch die Näherung mittels der Gaußschen Normalverteilung entsprechend Gleichung 72 bestimmt wurde. Es ist eindrücklich ersichtlich, dass die Variation der MTF der beiden Grünkanäle in sagittaler Richtung am geringsten ist. Der Sachverhalt ist damit zu erklären, dass im Produktionsprozess die Justage der Sensoren anhand der Echtzeitauswertung der MTF der Grünkanäle in Zeilenrichtung vorgenommen wird.

Die Bildfeldwölbung, der Farblängsfehler und der Astigmatismus können nun direkt aus Abbildung 56 abgelesen werden. Die Bildfeldwölbung entspricht der Variation einer einzelnen Kurve über die Sensorposition hinweg. Der Farblängsfehler ist gegeben durch die Abweichung der Maxima der MTF

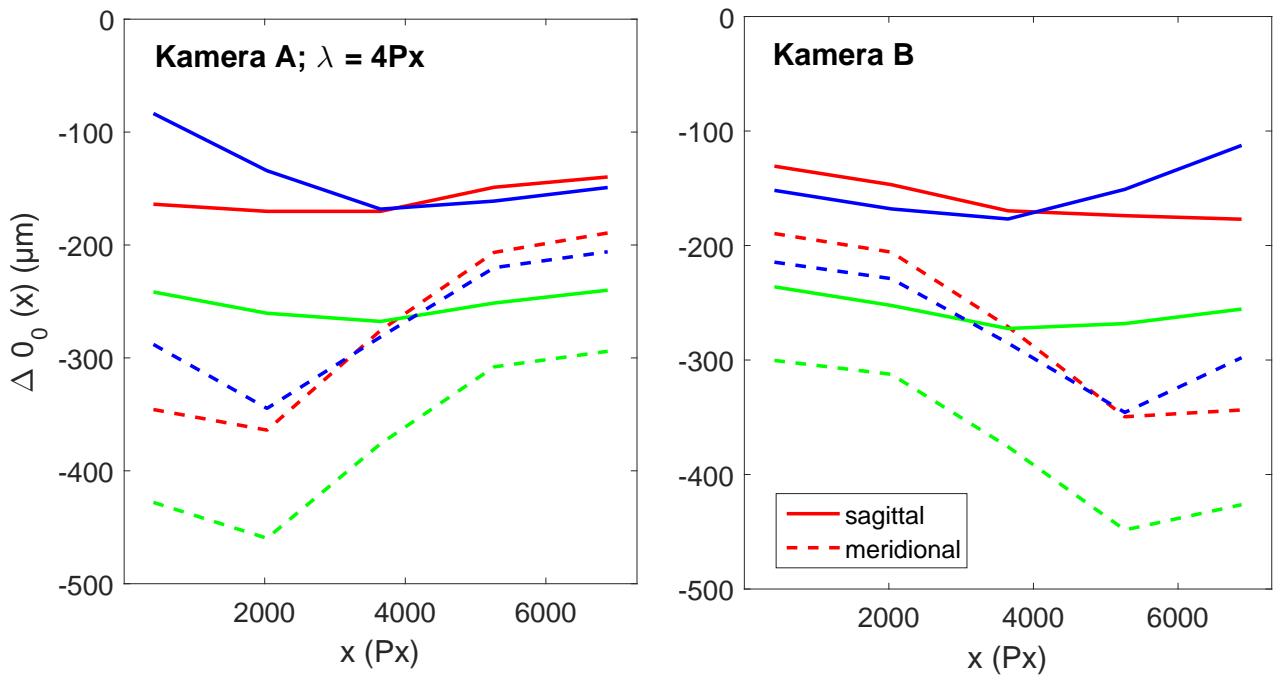


Abbildung 56: Dargestellt sind hier für beide Teilkameras und deren Farbkanäle die Lage der Maxima der $MTF \Delta o_0$ über die Sensorposition x . Hierzu wurde entsprechend der vorangegangenen Auswertungen der Bewertungsbereich über die Bildposition hinweg verschoben und die Position des Maximums der MTF ausgewertet. Hier ist die Wellenlänge der Kontrastmodulation auf dem Objekt $\lambda_x = \lambda_y = 4 \text{ Px}$ konstant gehalten. Aus dieser Darstellung lassen sich der Farblängsfehler, die Bildfeldwölbung und der Astigmatismus ablesen.

der einzelnen Farbkanäle. Der Astigmatismus bestimmt den Unterschied zwischen der sagittalen und der meridionalen Komponente. Die Bildfeldwölbung der Grün- und der Rotkanäle fällt hier mit ca. $\Delta o = 20 - 50 \mu\text{m}$ sehr gering aus, etwas stärker schlägt die Bildfeldwölbung der Blaukanäle zu Buche. Die sagittale wie auch die meridionale Komponente der MTF zeigen einen Farblängsfehler von etwa $\Delta o = 100 \mu\text{m}$.

In der Grafik 57 ist der relative Verlauf der MTF bei $\lambda_x = 4 \text{ px}$ der beiden Teilkameras über den Objektabstand dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass bei einer Objektweitenänderung von $\Delta o = 100 \mu\text{m}$ die MTF um ca. 10% abfällt. Der vorhandene Farblängsfehler liegt somit innerhalb der praktisch bestimmbaren Schärfentiefe des Systems. Auffallend ist jedoch der Unterschied der Lagen der Maxima der sagittalen und der meridionalen Komponenten der MTF . Hier zeigt sich, dass selbst sehr hochwertige und aufwendig korrigierte Objektive nicht zu vernachlässigende Abbildungsfehler zeigen. Die erreichbare maximale MTF in einer Ebene muss somit zwischen den Farbkanälen und den Raumrichtungen ausgemittelt werden. Alle Bedingungen können aufgrund der intrinsischen Differenzen nicht gleichzeitig optimiert werden.

Bei der Auslegung einer 3D Kamera ist es jedoch das Ziel, die Abbildungsleistung beider Teilkameras nicht nur in einer Ebene zu betrachten, sondern es soll die Abbildungsleistung über das Messvolumen hinweg optimiert werden. Daher können sich hier insbesondere die Bildfeldwölbung und der Farblängsfehler stärker auswirken, da ein geringer Wert in einer Ebene impliziert, dass eine der Komponenten sich schon weit ab von dem jeweiligen Maximum befindet. Daher wird bei einer Verschiebung der Objektebene der betrachtete Wert schneller abfallen und somit das Messvolumen einschränken, oder beziehungsweise in Abhängigkeit der auf dem Objekt auftretenden Modulationen das nutzbare Messvolumen weiter reduzieren. Aus den selben Beweggründen ist eine optimale Justage der beiden Teilkameras zueinander

unumgänglich, um das nutzbare Messvolumen zu maximieren. In Abbildung 57 ist bei der halben Ny-

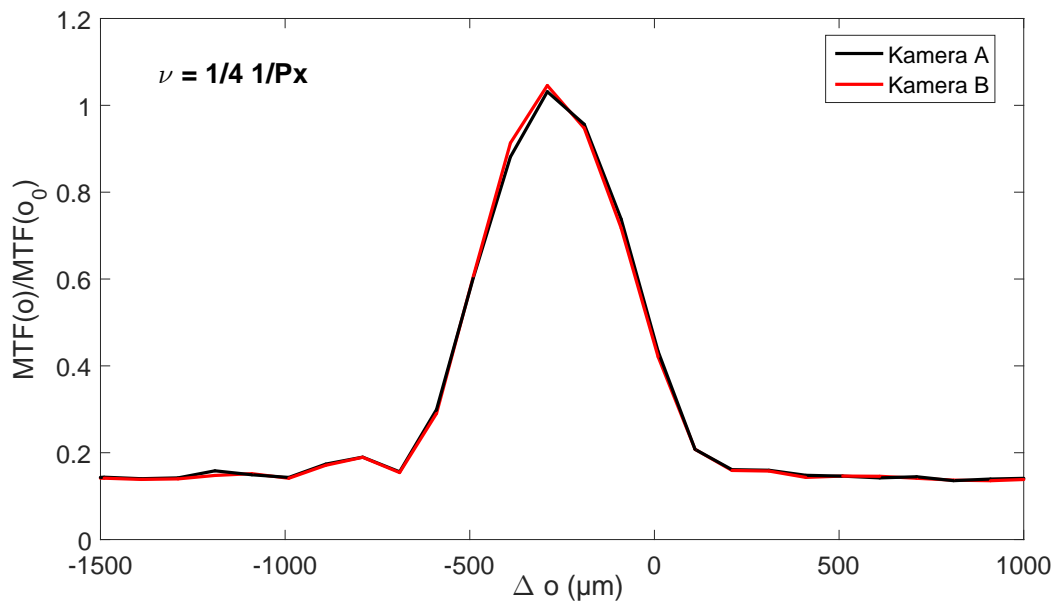


Abbildung 57: Zu sehen sind die überlagerten Verläufe der relativen Änderung der *MTF* beider Teilkameras in Abhängigkeit von Δo . Gemessen wurde hier in der Bildmitte des Grünkanals die sagittale Komponente. Innerhalb der erzielten Messgenauigkeit decken sich die beiden Verläufe, was auf einen guten Überlapp der Bildfelder beider Teilkameras hindeutet und somit eine maximale Ausnutzung des Messvolumens garantiert.

quistfrequenz die relative Änderung der *MTF* beider Teilkameras übereinander aufgetragen. Hier ist innerhalb der erreichten Messgenauigkeit kein ersichtlicher Unterschied zwischen den Verläufen der Kurven ersichtlich. Das impliziert, dass die Lagen der Bildfelder beider Teilkameras optimal zueinander justiert sind. Eine Verschiebung der beiden Verläufe zueinander würde darauf hinweisen, dass ein Objekt in beiden Teilkameras mit stark unterschiedlicher *MTF* abgebildet werden würde. Zusätzlich verringert sich die überlappende Fläche beider Kurven, welche das nutzbare Messvolumen widerspiegelt, da jeweils die Kamera mit der geringeren Abbildungsleistung die Messung limitiert. Weiterhin stellt es sich auch für die bildverarbeitende Algorithmik problematisch dar, wenn sich die Bildinhalte beider Teilkameras stark voneinander unterscheiden. Insbesondere wenn diese mit unterschiedlicher *MTF* abgebildet werden. Die Ähnlichkeit wird durch die verschiedene Tiefpasswirkung geringer ausfallen. Die 3D Messung wird somit zwangsweise verschlechtert. Weniger kritisch sind verschiedene Abbildungsmaßstäbe oder auch Unterschiede in der Verzeichnung beider Kameras. Eine Auflösungskorrektur kann durch ein Verschieben der Bildinformationen ohne schwerwiegenden Informationsverlust kompensiert werden. Die Tiefpasswirkung durch eine nicht ideale Justage der Sensoren kann hingegen nicht kompensiert werden. Daher werden die hier vorgestellten Analysemethoden eingesetzt, um im Produktionsprozess der Kameras die ideale Justage der beiden Teilkameras in sich und zueinander zu gewährleisten. Begründet durch die vorangegangene Diskussion wird hierbei die Auflösung und die Verzeichnung bei der Justage nur sekundär betrachtet. Im Prozess wird ausschließlich die räumliche Lage des Bildfeldes optimiert.

Im Folgenden wird die Abhängigkeit der Messgenauigkeit des Systems vom Systemrauschen, der Unschärfe und der Korrelationsfenstergröße diskutiert. Es werden die bisher erlangten Erkenntnisse zusammengeführt und hinsichtlich der praktischen Anwendung im Detail betrachtet.

6.5 Messrauschen, Korrelationsfenster und die dominante Objektmodulationsfrequenz

Die Kontrastfunktion auf einer realen Objektoberfläche kann in Abhängigkeit der optischen und geometrischen Eigenschaften der Oberfläche sehr unterschiedlich ausfallen. Steile Signalfanken zeichnen sich durch eine hohe Bandbreite des Signals aus. Die Präsenz von stochastisch verteilten feinen Strukturen ermöglicht eine gute Korrespondenzanalyse für jeden Teilbereich des Bildes. Die Verteilung einer solchen stochastischen Kontrastfunktion kann typischerweise über eine Bandbreite und eine dominante Frequenz definiert werden. Die Gesamtheit der Freiheitsgrade lässt sich analytisch schwer erfassen. Daher wurde hier ein experimenteller Ansatz gewählt, um die Abhängigkeit der Korrelationsergebnisse von der dominanten Modulationsfrequenz im Bild $\gamma_o^{dom} = 1/\lambda_o^{dom}$ zu analysieren. Diese Betrachtungsweise soll einen konzeptionellen Ansatz liefern, um in Abhängigkeit von dem zu untersuchenden Objekt die Auflösung der Kamera und die Wahl der Größe des Korrelationsfensters auf Basis von Messdaten zu optimieren. Das Verhältnis der Kameraauflösung und der Größe des Korrelationsfensters haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Messergebnisse, daher wird dieser Sachverhalt hier im Detail betrachtet.

Zur Charakterisierung werden definierte Objektoberflächen benötigt; es gilt die Kontrastfunktion kontrolliert einstellen zu können. Als Verfahren wurde hier ein hochauflösender Digitaldrucker eingesetzt. Mit diesem lassen sich kostengünstig und reproduzierbar Testobjekte herstellen. Vorab wurde die maximale Auflösung des Druckers (*HP Designjet*) untersucht. Hierbei wurden feine Strukturen gedruckt und das Auflösungsvermögen mit einem Lichtmikroskop qualitativ beurteilt. Hierbei hat sich gezeigt, dass die maximale Auflösung begrenzt wird durch den typischen Druckpunktdurchmesser, welcher bei dem eingesetzten System und einfachem Fotopapier ca. bei $40\text{ }\mu\text{m} \hat{=} 635\text{ dpi}$ liegt. Die vom Hersteller angegebene maximale Druckauflösung liegt bei 1200 dpi, was der internen digitalen Auflösung des Renderings entspricht. Somit wird sichergestellt, dass bei der maximalen Druckqualität die druckerinterne digitale Auflösung nicht die Auflösung des Druckes limitiert. Aufgrund dieser Betrachtungen kann abgeleitet werden, dass sich der Digitaldruck eignet, um Strukturen mit einer Auflösung $\geq 600\text{ dpi}$ herzustellen. Somit sollte das Stereokamerasystem eine geringere Auflösung als der Druck aufweisen, sodass in der folgenden Untersuchung nicht die Auflösung des Druckverfahrens limitierend auf die Auswertung der Bilddaten wirkt. Es wird aufgrund dieser Überlegungen eine Stereo-Zeilenumkamera eingesetzt, welche eine Auflösung von $Res = 70\text{ }\mu\text{m/Px} \hat{=} 363\text{ dpi}$ aufweist.

Zur Herstellung der Testobjekte, bzw. der Rauschmuster, wurde eine Funktion entwickelt, welche es ermöglicht Bilder zu erzeugen, die eine statistische Struktur aufweisen. Wobei die auftretenden Wellenlängen der Modulation und die Bandbreite eingestellt werden können. Im ersten Schritt werden in dieser Funktion die Bildgröße und die Auflösung definiert. Weitere Parameter sind die Zentralwellenlänge der einzelnen Frequenzbeiträge sowie deren Bandbreite und die Amplitude. Auf Basis der Bildgröße und der Auflösung wird mittels eines Zufallsgenerators ein normalverteiltes Rauschen erzeugt. Mittels der Wellenlängen und der Bandbreiten werden Fourierfilter bestimmt, welche auf die Fouriertransformation des Bildes angewendet werden. Die aufgenommenen Bilddaten sind in Abbildung 58 zu sehen.

Zur Analyse der Auswirkung des Verhältnissen von der Wellenlänge der Modulation auf dem Objekt und der Korrelationsfenstergröße wurde das Testobjekt 5-fach aufgenommen und nach Gleichung 58 das mittlere Messrauschen $\overline{\sigma}_z$ bestimmt. Das Messrauschen wurde für jede Modulation auf dem Objekt und für Korrelationsfenster in dem Bereich von $l_F = 7 \dots 27\text{ Px}$ ausgewertet. Intuitiv kann die Anzahl der auftretenden Modulationen innerhalb eines Fensters als Informationsgehalt interpretiert werden. Daher wurde in Abbildung 59 das Messrauschen für jede Teilmessung über das auf die Modulationswellenlänge normierte Korrelationsfenster l_F/λ_{dom} aufgetragen. Durch diese Normierung gehen die einzelnen Datensätze in einen (fast) kontinuierlichen Verlauf über. Es wird ersichtlich, dass das Messrauschen weitestgehend unabhängig vom Korrelationsfenster und der Modulationswellenlänge ist, so lange gilt $l_F > 2 \cdot \lambda_{dom}$.

Das Messrauschen σ_z steigt sehr stark an, sobald $l_F \leq 2 \cdot \lambda_{dom}$ eintritt. Qualitativ kann das Verhalten dadurch erklärt werden, dass mindestens eine vollständige Wellenlänge der Modulation im betreffenden Fenster enthalten sein muss, sodass hinreichende Signalkontraste und somit Flanken innerhalb dem Fens-

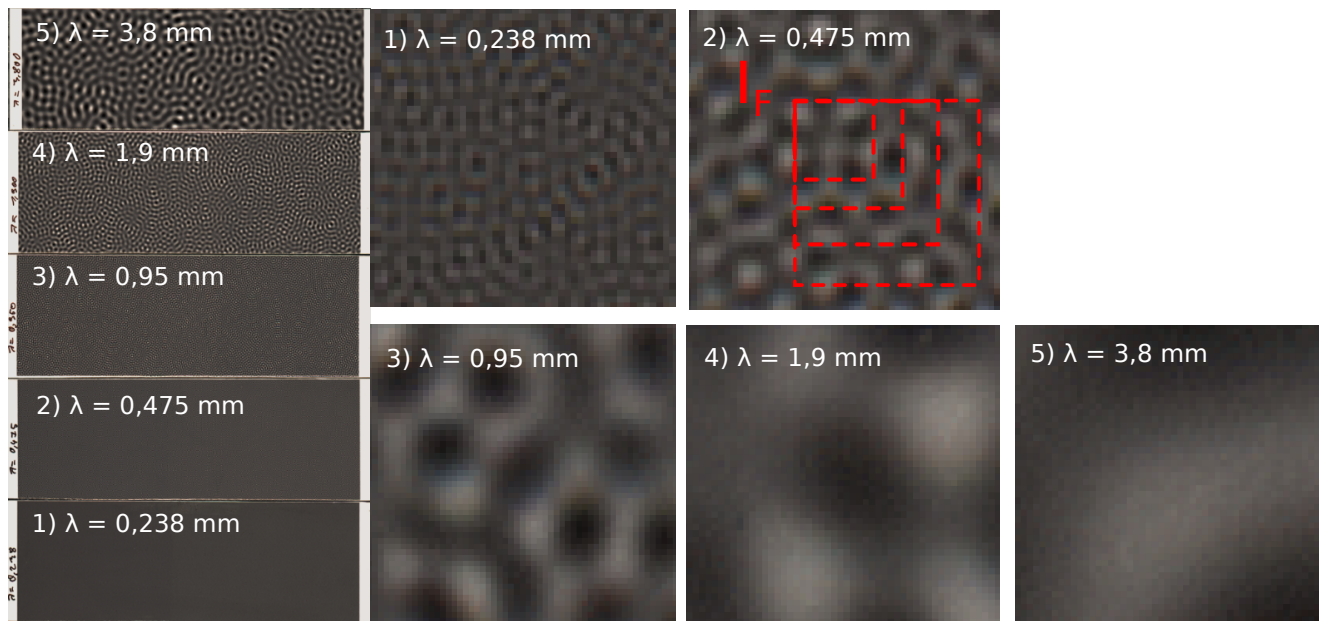


Abbildung 58: Auf der linken Seite ist ein mit der 3D Kamera aufgenommenes Bild von gedruckten, variierenden stochastischen Mustern zu sehen. Eingetragen ist jeweils die Wellenlänge der dominanten Modulation des Musters. Die Bandbreite entspricht jeweils $1/10$ der Zentrallwellenlänge. Auf der rechten Seite sind die einzelnen Bereiche vergrößert dargestellt. Oben rechts sind exemplarisch verschiedene Größen der verwendeten Korrelationsfenster eingezeichnet. Das Verhältnis der dominanten Wellenlänge und der Korrelationsfenstergröße bestimmt die Anzahl an Modulationen im Fenster.

ter vorliegen, welche eine hoch aufgelöste Bestimmung des Korrelationsmaximums erlauben. Befindet sich weniger als eine vollständige Modulation im Korrelationsfenster, kann eine effektive Verschiebung des Korrelationsmaximums durch die verwendete Normierung in der Berechnung auftreten. Liegt beispielsweise nur noch der Hochpunkt einer Modulation innerhalb des Suchfensters, kann die Disparität nicht mehr hinreichend präzise bestimmt werden.

Die hier abgeleiteten Ergebnisse sind einerseits für die Auslegung eines Messsystems relevant, da anhand der auftretenden charakteristischen Modulationen des Kontrastes der Objektoberfläche die Kameraauflösung und das Korrelationsfenster angepasst werden können. Hierzu kann mit einem 2D-Kamerasystem mit variabler Auflösung im Sinne einer Voruntersuchung das Objekt erfasst und durch eine Fouriertransformation hinsichtlich der auftretenden Modulationen analysiert werden. Außerdem sind die Ergebnisse relevant bei der Interpretation der weiteren Messergebnisse.

Im Folgenden wird das Messrauschen in Abhängigkeit des Abstandes der Messfläche zum Arbeitsabstand Δo unter Variation der Ausdehnung des Korrelationsfensters betrachtet. Die hier durchgeführten Betrachtungen bei konstantem Arbeitsabstand und variierender Modulation auf dem Objekt lassen sich qualitativ auf den Fall eines durch den Unschärfekreis der Defokussierung gefilterten Datensatzes übertragen und helfen somit zusätzlich bei der Interpretation der weiteren Messungen.

6.6 Schärfentiefe als optischer Tiefpass und der Einfluss auf die 3D Oberflächenmessung

Auf Basis der vorangegangenen Kapitel kann die Schärfentiefe als ein optischer Tiefpass verstanden werden, dessen Grenzfrequenz abhängig vom Abstand des Objektes zur optimalen fokussierten Ebene, also der Sollobjektweite ist, in welcher die maximale MTF erreicht wird. Der entsprechende Tiefpassfilter bewirkt einen Informationsverlust in den beiden Teilbildern der Stereokamera. Daher ist davon auszuge-

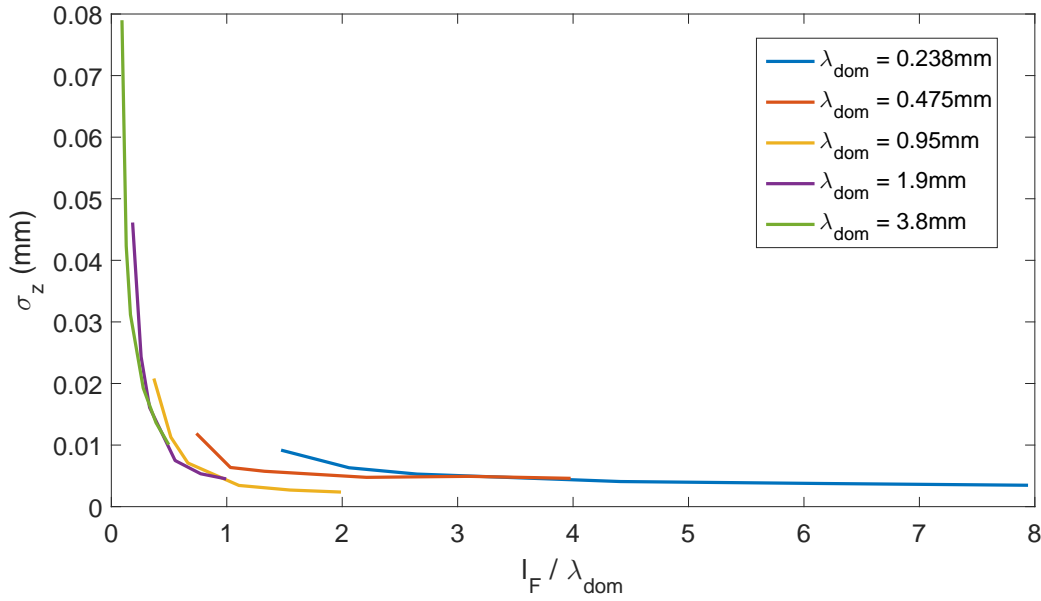


Abbildung 59: Aufgetragen ist das Messrauschen $\bar{\sigma}_z$ in Abhängigkeit von dem auf die Modulationswellenlänge normierten Korrelationsfenstergröße l_F / λ_{dom} . Die einzelnen Datensätze ergänzen sich näherungsweise zu einem (fast) kontinuierlichen Verlauf. Das Messrauschen nimmt stark zu, wenn nicht mindestens eine vollständige Modulation in ein Korrelationsfenster fällt.

hen, dass mit dem Informationsverlust auch ein Verlust in der Messgenauigkeit einhergeht. Der Informationsgehalt, der dem Korrelationsalgorithmus zur Verfügung steht, um die relative Bildverschiebung der Bildinhalte der beiden Teilkameras zu bestimmen, ist einerseits gegeben durch die vorhandene Kontrastfunktion auf der Objektoberfläche, der Übertragungsfunktion des optischen Systems und andererseits durch die Größe des Korrelationsfensters. Je größer das Korrelationsfenster ist, desto mehr Information in Form von steigenden und fallenden Signalfanken in x- und y- Richtung stehen dem Algorithmus zum Abgleich der Bildinhalte zur Verfügung. Wird der Bildinhalt bei konstanter Korrelationsfenstergröße mit einem Tiefpass gefiltert, führt das zu einer geringeren Anzahl von Modulationen im jeweiligen Fenster, bzw. sind die Amplituden der Modulationen stark verringert. Wird bei gleichbleibender Übertragungsfunktion das Korrelationsfenster verkleinert, führt das ebenfalls zu einem Informationsverlust und somit qualitativ zu einem ungenaueren Ergebnis der gemessenen Disparität.

Absolut bewertet werden im Folgenden die Einflüsse der angesprochenen Systemparameter auf das Rauschen der Höhenmessung. Hierzu wird auf dem Referenzobjekt, welches in Abbildung 51 zu sehen ist, das Rauschen der Höhenmessung mittels der Standardabweichung σ_z nach Gleichung 73 gemessen. Aufgetragen wird das Messrauschen im ersten Schritt über die Sensorposition und den Abstand des Objekts zur idealen Fokusebene Δo .

Der Sachverhalt wird anhand der Daten, die in Abbildung 60 dargestellt sind, diskutiert. Es wurde nach [OptAssyst, 2016] das Messrauschen bestimmt (siehe Gleichung 73). In dem Standard wird definiert, dass unter idealen Laborbedingungen direkt aufeinanderfolgend die Ebene eines Referenzobjektes aufgenommen wird. Es wird die punktweise Differenz beider Datensätze H und H' auf einem identischen Bildbereich ermittelt und die Summe der mittleren quadratischen Abweichungen auf die Anzahl der Messpunkte $N_x \cdot N_y$ normiert. Die ausgewerteten Bildbereiche sind $N_x = N_y = 400$ Px groß. Zusätzlich muss durch $\sqrt{2}$ geteilt werden, da nicht die Differenz der streuenden Werte relativ zum Mittelwert

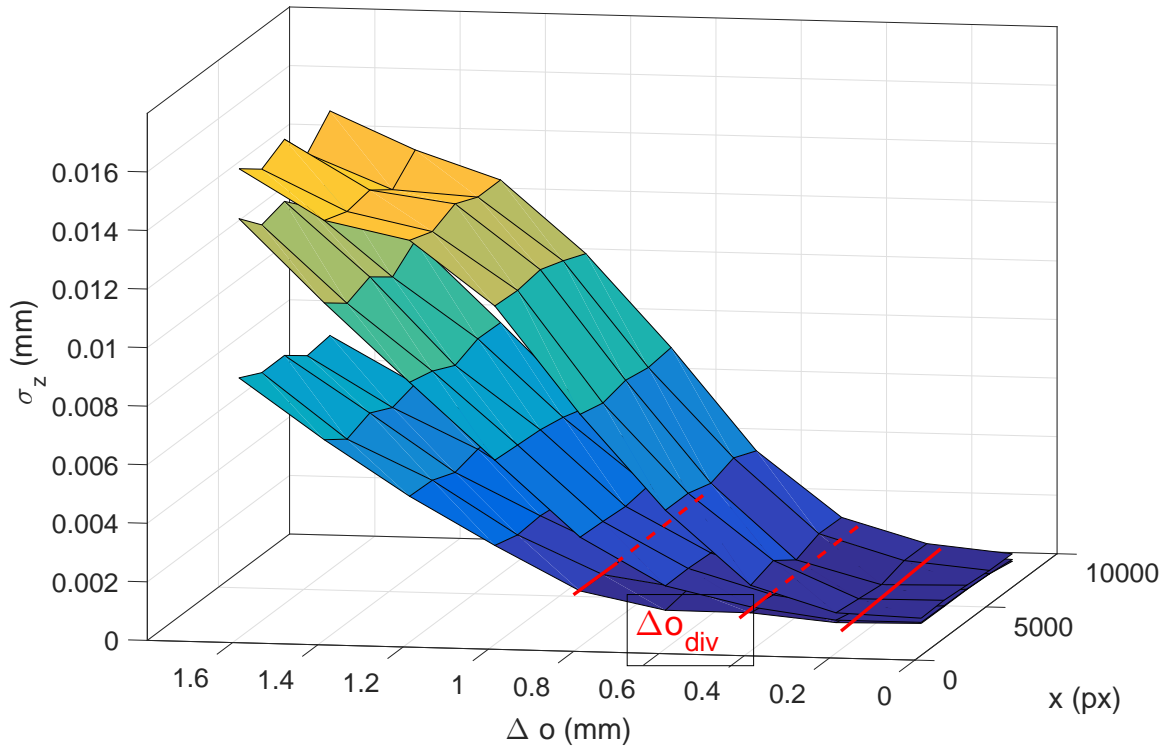


Abbildung 60: Aufgetragen ist das Messrauschen $\bar{\sigma}_z$ des 3D-Messsystems nach OptAssyst [2016]. Variiert wird entlang den Axen die Sensorposition x um das Messrauschen über die Zeilenlänge der Kamera zu bewerten, sowie der Abstand Δo der Objektoberfläche zur optimalen Objektweite o_0 . Die Kurvenschar entspricht der Variation der Korrelationsfenstergröße über die Werte $l_{px} = 9, 15, 27$ Px. Das Zusammenspiel der Korrelationsfenstergröße und der Tiefpasswirkung durch die Defokussierung ist klar in den verschiedenen Steigungen der Ebenen ersichtlich. Hier muss auch beachtet werden, dass bei kleinerem Korrelationsfenster der Kniepunkt Δo_{div} des höheren Anstiegs des Messrauschens sich zu kleineren Werten verschiebt.

betrachtet wird, sondern die Differenz zwischen zwei durch Rauschen gestörte Werte. Somit ergibt sich die zweifache quadratische Abweichung:

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{N_x \cdot N_y} \sum_i^{N_x} \sum_j^{N_y} (H(x_i, y_j) - H'(x_i, y_j))^2} \quad (73)$$

Es sind $H(x_i, y_j)$ und $H'(x_i, y_j)$ die beiden Bildbereiche der gemessenen Höhen zu den Koordinaten (x_i, y_j) . Um die Genauigkeit der Messung des Messrauschens zu erhöhen, wurden 5 aufeinander folgende Bilddatensätze ausgewertet und aus den einzelnen bestimmten Messungen $\sigma_{z,i}$ der Mittelwert gebildet:

$$\bar{\sigma}_z = 1/4 \sum_i^4 \sigma_{z,i} \quad (74)$$

Die Resultate der Auswertung sind in Abbildung 60 zu sehen. Die Ebenen mit dem geringeren Messrauschen korrespondieren zu den Auswertungen mit dem größeren Korrelationsfenster. Wie erwartet steigt das Messrauschen mit kleinerem Korrelationsfenster an, da prinzipiell bei gleichbleibender Modulation des Bildsignals der Informationsgehalt bei Verkleinerung des Korrelationsfensters reduziert wird.

Δo_{div}	l_F	DOF_o^σ
0.2 mm	9 Px	0.3 mm
0.4 mm	15 Px	0.4 mm
0.8 mm	27 Px	0.65 mm

Tabelle 4: In der Tabelle sind die Werte von Δo_{div} eingetragen, ab welchen die Steigung des Messrauschens $\sigma_z(\Delta o)$ in Abhängigkeit von der Änderung der Objektweite Δo zunimmt (siehe Abbildung 60). Entsprechend der Fenstergröße l_F wird aus Abbildung 55 die Schärfentiefe DOF_o^σ für die Wellenlänge $\lambda_o = l_F$ eingetragen. Ersichtlich ist, wie der Anstieg des Messrauschens bei Δo_{div} mit der Schärfentiefe DOF_o^σ korreliert.

In den Daten sind grundlegend zwei Bereiche zu unterscheiden. Bei geringer Variation der Objektweite $\Delta o < 0.5$ mm ändert sich im Falle des größten Korrelationsfensters das Messrauschen $\bar{\sigma}_z$ kaum merklich im Vergleich zu den Ergebnissen in der optimalen Objektweite $o = o_0$. Ab einem gewissen Wert von $\Delta o_{div} = 0.2, 0.3, 0.6$ mm, der abhängig von der Korrelationsfenstergröße l_F ist, steigt das Messrauschen linear mit Δo an. Wobei die Steigung ebenfalls abhängig von der Größe des Korrelationsfensters ist. Spannend ist nun der Vergleich der Daten des Messrauschens nach Abbildung 60 mit der gemessenen frequenzabhängigen Schärfentiefe, welche in Abbildung 55 aufgetragen ist. Der angesprochene Kniepunkt Δo_{div} des Messrauschens, ab welchem die Steigung von $\bar{\sigma}_z(\Delta o)$ stark zunimmt, ist in Tabelle 4 eingetragen.

Die Schärfentiefe DOF_o^σ wurde entsprechend der Messung, welche in Abbildung 55 dargestellt ist, abgelesen. Die relevante Schärfentiefe wird definiert über die Annahme, dass die Korrelationsfenstergröße direkt die relevante Wellenlänge bestimmt. Also gilt $DOF_o^\sigma(\lambda_o = l_F)$. Die letzte Annahme wird durch die Ergebnisse gerechtfertigt, welche in Abbildung 59 dargestellt sind. Hier wurde abgeleitet, dass Wellenlängen der Modulation des Objektkontrastes λ_o , welche die Korrelationsfenstergröße l_F überschreiten $\lambda_o > l_F$, einen wesentlich geringeren Beitrag zu einer reproduzierbaren Höhenmessung beitragen. In Tabelle 4 konnten nun die Untersuchungen zur frequenzabhängigen Schärfentiefe mit dem Verhalten des Messrauschens in direkten Zusammenhang gebracht werden.

Weiterhin ist in Abbildung 60 erkennbar, dass entlang der Sensorposition das Messrauschen innerhalb der Messgenauigkeit der Untersuchung konstant ist. Daher ist davon auszugehen, dass die Änderung der MTF entlang der Sensorzeile keinen spürbaren Einfluss auf das Messrauschen hat. Innerhalb des Messvolumens dominieren klar die Effekte verursacht durch die Defokussierung. Die in Abbildung 56 dargestellten Messungen der Variation der MTF hat somit keinen Einfluss auf das Messrauschen des Systems. In dem Höhenmessbereich von ± 0.5 mm liegt bei der Verwendung der maximalen Größe des Korrelationsfensters $l_F = 27$ Px das Messrauschen bei etwa $\bar{\sigma}_z \approx 1 \mu\text{m}$. Nach Gleichung 34 hat die Kamera CP000520-D02-005-0035 eine geometrische Höhenauflösung von $\delta D / \delta o \approx 90$ D/mm. Der hier bestimmte Wert des Messrauschens kann somit dahingehend eingesetzt werden, dass über das Messrauschen $\bar{\sigma}_z$ das Rauschen der Berechnung der Disparität durch die Korrelation bestimmt werden kann. Es ergibt sich zu $\sigma_D \approx 0.1$ Px. Unter idealen Bedingungen, wie sie hier in der Nähe von $o = o_0$ vorliegen, kann also die Disparität D im Bild mit einem Rauschen von einem Zehntel eines Pixels berechnet werden.

Das nach [OptAssyst, 2016] definierte Auflösungsvermögen der Messung ist definiert über die Möglichkeit mit 95 % Wahrscheinlichkeit zwei benachbarte Messwerte auflösen zu können. Es wird daher wie folgt über das Messrauschen bestimmt:

$$\delta_{min}(z) = \sqrt{8} \cdot \bar{\sigma}_z \quad (75)$$

Somit ergibt sich in dem hier behandelten konkreten Fall ein Auflösungsvermögen von $\delta_{min}(z) \approx 2.83 \mu\text{m}$.

Mittels dem hier vorgestellten Verfahren kann das Messrauschen und die zugehörige Messauflösung des Systems über das gesamte Messvolumen bestimmt werden. Aus den Betrachtungen kann abgeleitet werden, dass der nutzbare Höhenmessbereich des Systems nicht eindeutig definiert werden kann,

da das Messrauschen stark von der Defokussierung und dem eingesetzten Korrelationsfenster abhängt. Zusätzlich ist relevant, welche Frequenzen in der Kontrastmodulation auf der Objektoberfläche auftreten. Die hier geführten Analysen setzen voraus, dass Strukturen mit einer hohen Bandbreite verfügbar sind. Ist beispielsweise bei geringeren Frequenzen keine Modulation auf dem Objekt vorhanden, muss davon ausgegangen werden, dass sich die Defokussierung sehr viel stärker auf das Messrauschen auswirkt. In diesem Fall kann durch den Tiefpass jegliche Modulation vernichtet werden. Treten hingegen keine hohen Frequenzen auf, kann qualitativ davon ausgegangen werden, dass die Defokussierung sehr viel geringere Auswirkungen hat. Es sind in diesem Fall schlichtweg keine hohen Frequenzen im Signal vorhanden, deren Amplitude durch die Defokussierung verringert werden könnte.

Die hier vorgestellte Methode zur Analyse der Abhängigkeiten des Messrauschens muss daher applikationsspezifisch angewendet werden, um die Messauflösung über den Messbereich auf einer bestimmten Probenoberfläche zu bestimmen. Das innerhalb der vorliegenden Arbeit bestimmte Messrauschen kann jedoch als beste Referenz verwendet werden, da auf dem Referenzobjekt eine hohe Bandbreite von Frequenzen mit hoher Modulation auftreten. Weiterhin kann über die abgeleitete Abhängigkeit des Messrauschens mittels eines Bildes, welches in der idealen Fokusebene aufgenommen wurde, dass Messrauschen in Abhängigkeit von Δo und l_F abgeschätzt werden.

Somit kann aus der Untersuchung des positions- und abstandsabhängigen Messrauschens die optimale Lage des Messojekts im Messvolumen des Systems abgeleitet werden. Auch sollte in Abhängigkeit des zu untersuchenden Objektes die Korrelationsfenstergröße unter Betrachtung des Messrauschens optimiert werden. Grundlegend lässt sich sagen, dass Bereiche des zu vermessenden Objektes mit hoher Modulationsfrequenz und höchster Anforderung an die Reproduzierbarkeit der Messung möglichst nahe am optimalen Arbeitsabstand o_0 zu liegen kommen sollten. Hingegen können Bereiche, welche niederfrequente Modulationen aufweisen oder das flächenhafte Mitteln über große Bereiche erlauben, weiter entfernt vom Arbeitsabstand vermessen werden. In diesem Zusammenhang muss weiterhin betrachtet werden, wie die Auswirkung des SNR der Bilddaten, beziehungsweise genauer gesprochen das Verhältnis aus Rauschen und Signalkontrast, das Messergebnis der Höhenmessung bestimmt. Hierzu wird der bisher analysierte Datensatz um den Freiheitsgrad des SNR der Eingangsbilddaten erweitert.

6.7 Einfluss von Systemrauschen, Korrelationsfenstergröße und Defokussierung auf die 3D-Oberflächenrekonstruktion

In diesem Kapitel wird ein messtechnischer Zusammenhang zwischen dem Messrauschen der Höhenmessung und dem eingehenden Rauschen der Bilddaten hergestellt. Es wird hierzu das Messrauschen hinsichtlich der Kameraaussteuerung, der Defokussierung (Abstand Δo) und dem Korrelationsfenster untersucht.

Die Referenzebene, wie in Abbildung 51 dargestellt, wird herangezogen, um das Messrauschen nach Gleichung 73 zu bestimmen. Die Kameraaussteuerung wurde ausgehend von der vollen Kapazität $n_{fw}^e = 50000$ um einen Faktor 14 variiert. Praktisch relevant ist die Betrachtung über einen Faktor 10 der Sensoraussteuerung. Eine weitere Verringerung der Aussteuerung kann in der Regel durch eine Anpassung der Beleuchtung vermieden werden. Um über den relevanten Bereich hinaus die Auswirkungen des höheren Signalrauschens der Bilddaten zu verstehen, wurde hier das SNR um einen Faktor 14 variiert. Das maximale SNR im Falle des durch Schrotrauschen limitierten Signals liegt hier bei $SNR_{fw} = \sqrt{n_{fw}^e} \approx 224$. Bei einer Verringerung der Sensoraussteuerung um einen Faktor $n_{fw}^e/n_{min}^e = 14$ reduziert sich das erreichbare maximale SNR zu $SNR_{fw}/SNR_{min} = \sqrt{n_{fw}^e/n_{min}^e} \approx 3.7$, also $SNR_{min} \approx 61$. In Abbildung 61 ist das Messrauschen $\bar{\sigma}_z$ über den Abstand Δo und die Sensorposition, also effektiv über das Messvolumen des Systems aufgetragen. Die einzelnen Datensätze entsprechen der Variation der Sensoraussteuerung, wobei jeder Datensatz hier mit dem maximalen Korrelationsfenster von $l_F = 27$ Px ausgewertet wurde. Beachtlich ist hierbei, wie gering der Einfluss des SNR der Bilddaten ausfällt. Wie in der vorherigen Darstellung unter Variation des Korrelationsfensters (Abbildung 60) ist auch hier keine Tendenz des

Messrauschens über die Sensorposition hinweg erkenntlich. Daher wird im Folgenden das Messrauschen über die Sensorbreite x hinweg gemittelt dargestellt. Somit kann in der dreidimensionalen Darstellung die frei gewordene Achse für einen weiteren Parameter genutzt werden.

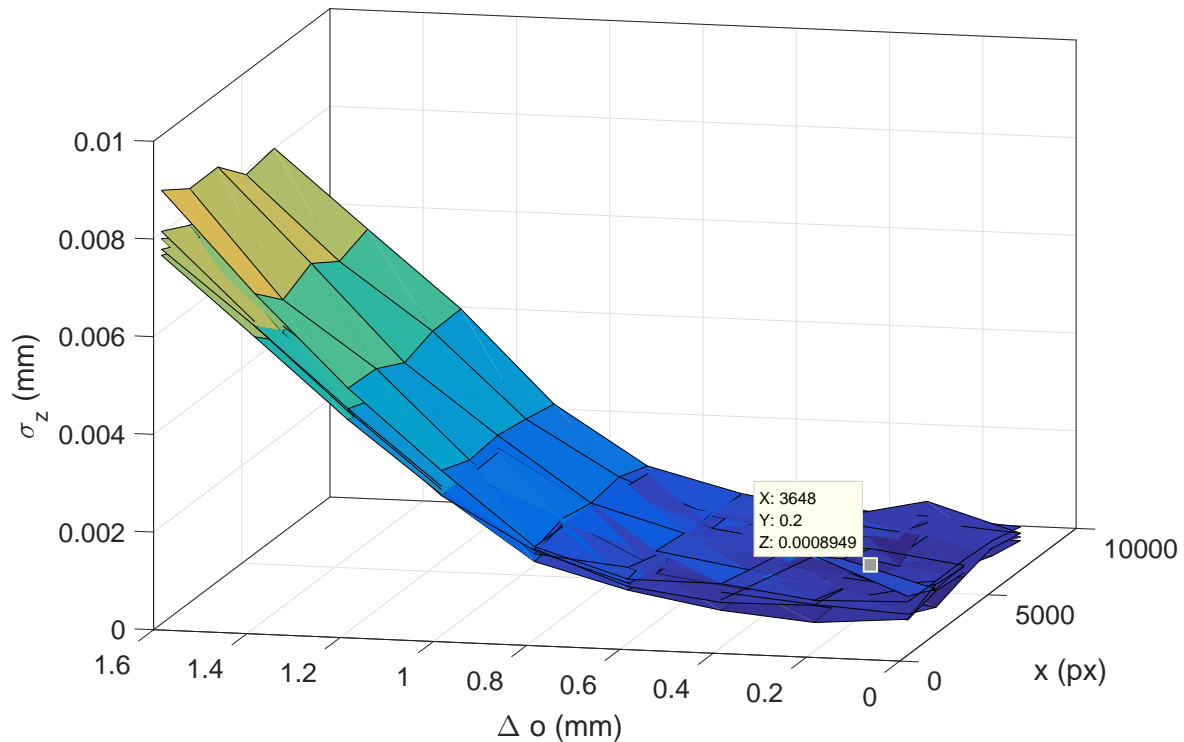


Abbildung 61: Aufgetragen ist hier das Messrauschen $\overline{\sigma}_z$ über den Abstand der zu vermessenen Ebene zum Arbeitsabstand der Kamera Δo . Zwischen den Ebenen, bzw. den einzelnen Datensätzen wurde die Aussteuerung über einen Faktor 14 variiert. Das entspricht einer relativen Variation des SNR der Bilddaten von 3.7. Verwendet wurde ein Korrelationsfenster der Größe $l_F = 27$ Px. Hierbei ist beachtlich, wie gering sich das SNR der Bilddaten auf das Messrauschen der 3D-Messung $\overline{\sigma}_z$ auswirkt.

Abbildung 62 zeigt das Messrauschen der 3D-Messung $\overline{\sigma}_z$ aufgetragen über die Größe des Korrelationsfensters l_F und dem Abstand zum optimalen Arbeitsabstand Δo . Die Schar der Ebenen ergibt sich wiederum durch die Variation der Sensoraussteuerung, wobei natürlich mit höherer Sensoraussteuerung das Messrauschen $\overline{\sigma}_z$ geringer ausfällt. In dieser Darstellungsform zeigt sich, dass das verringerte SNR stark ins Gewicht fällt, wenn zwei Fälle zeitgleich eintreten:

- Das betrachtete Messfeld muss im Höhenmessbereich relativ weit außen liegen $\Delta o > 0.5$ mm.
- Die Größe des Korrelationsfensters ist kleiner als 15 Pixel $l_F < 15$ Px.

Unter diesen Bedingungen fächern die Datensätze unter Variation der Sensoraussteuerung auf (Abbildung 62 rechts oben).

Zusammenfassend kann somit abgeleitet werden, dass das SNR der Bilddaten der Stereokamera unter nicht idealen geometrischen Bedingungen relevant wird. Im Umkehrschluss kann der nutzbare Höhenmessbereich, welcher beispielsweise über einen maximalen zulässigen Wert des Messrauschens definiert werden kann, bei einem höheren SNR der eingehenden Bilddaten größer gewählt werden. Der Dynamikbereich des Messsystems ist in diesem Fall direkt abhängig vom Rauschen der zugrunde liegenden Bilddaten.

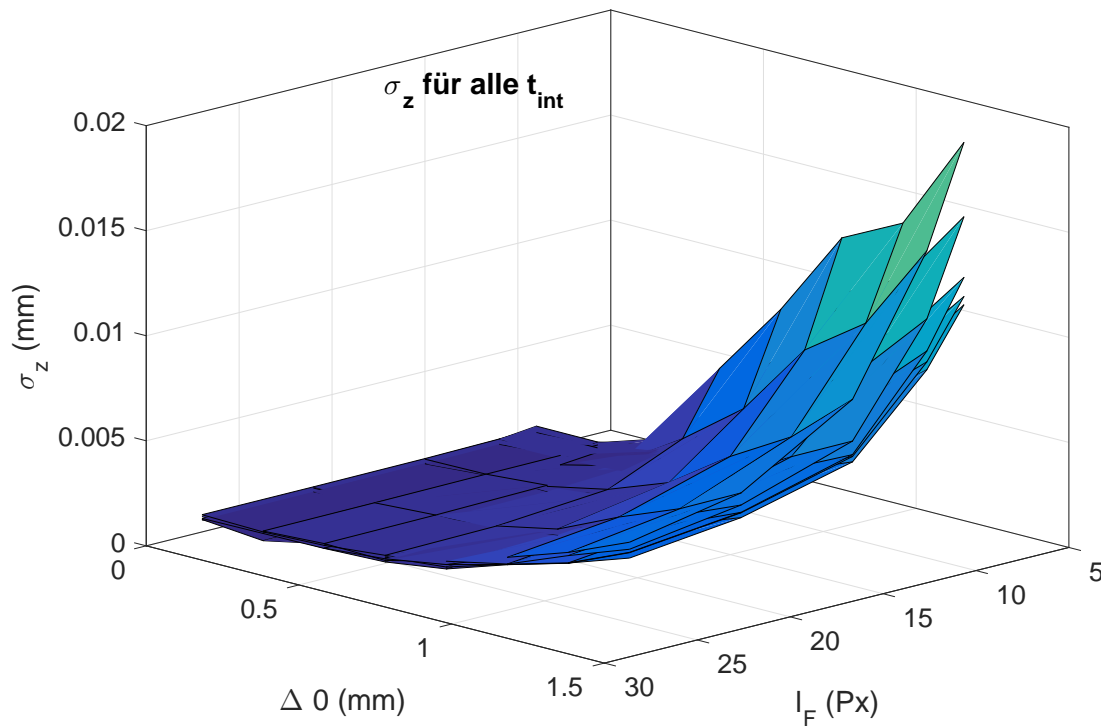


Abbildung 62: Aufgetragen ist das Messrauschen $\overline{\sigma}_z$ in Abhängigkeit des Abstandes der Messebene zum Arbeitsabstand Δo sowie von der Korrelationsfenstergröße l_F . Die Kurvenschar entspricht der geänderten Integrationszeit und somit dem Rauschen des Bildsignals. Das Messrauschen steigt stark an im Falle kleiner Korrelationsfenster $l_F < 15$ Px und großer Abstände $\Delta o > 1$ mm zum idealen Arbeitsabstand (siehe der starke Anstieg der Grafen oben rechts).

Diese Abhängigkeit kann noch weiter heraus gearbeitet werden, indem aus dem mittleren Bildsignal und der Variation der Sensoraussteuerung das SNR berechnet wird. In Abbildung 63 ist das Messrauschen $\overline{\sigma}_z$ aufgetragen über das mittlere SNR der Bilddaten und der Größe des Korrelationsfensters l_F . Die Schar der Datensätze ergibt sich unter Variation von Δo . In dieser Darstellung der Daten ist eindrücklich ersichtlich, dass sich das Messrauschen nicht auf einfache Weise über die variierten Parameter beschreiben lässt. Das Messrauschen verhält sich nicht linear unter Variation der Dynamik der Kameras. Zudem zeigt die Korrelationsfenstergröße einen nichtlinearen Einfluss. Es wurden verschiedene Versuche unternommen, um das Verhalten des Messrauschens auf eine einfache analytische Abhängigkeit vom Bildkontrast, dem SNR der Bilddaten und der Größe des Korrelationsfensters l_F zurückzuführen. Eine grundlegende und global gültige analytische Abhängigkeit konnte nicht gefunden werden. Daher wird an dieser Stelle vorgeschlagen, die präsentierten Datensätze als empirisches Modell einzusetzen. Es kann mittels einer mehrdimensionalen Interpolation durch abschnittsweise stetige Polynomfunktionen ('Spline'-Näherung) ein Modell erstellt werden, welches es ermöglicht, aus den gemessenen Datensätzen das Messrauschen zu jedem Zwischenschritt der Parameter abzuleiten. Eine Extrapolation zu Parameterwerten außerhalb des vermessenen Raumes kann allerdings nicht durchgeführt werden. Das empirische Modell kann somit als Funktion dargestellt werden, wobei diese in Abhängigkeit des SNR , der Korrelationsfenstergröße l_F und des Abstandes zum Arbeitsabstand Δo das Messrauschen voraussagen kann $\rightarrow \overline{\sigma}_z(SNR, l_F, \Delta o)$. Neben dem hier behandelten Kamertypen kann dieses Modell für jeden Kamertypen empirisch durch Messdaten bestimmt und somit für die entsprechende Applikation das zu erwartende Messrauschen aus dem Modell abgeleitet werden. Es wurde in Kapitel 2.3 der Dynamikbe-

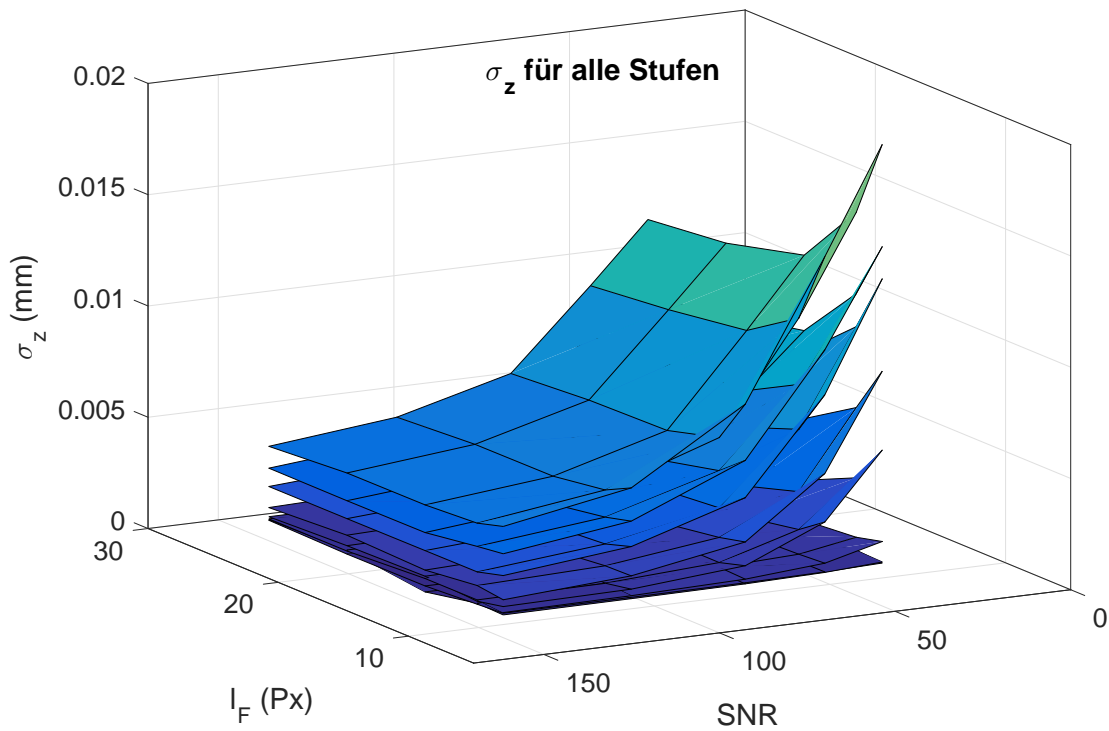


Abbildung 63: Das Messrauschen $\overline{\sigma}_z$ ist in Abhängigkeit vom SNR und der Korrelationsfenstergröße l_F dargestellt. Die einzelnen Ebenen ergeben sich unter Variation des Abstandes der Meszebene zum Arbeitsabstand Δo . Ist das Korrelationsfenster kleiner als 15 Pixel $l_F < 15 \text{ Px}$ steigt der Einfluss des SNR der Bilddaten auf das Messrauschen $\overline{\sigma}_z$ stark an.

reich des Messsystems angesprochen. Definiert werden kann der Dynamikbereich zu $DR = \Delta o_{max} / \overline{\sigma}_z$. Hierbei wurde vorausgesetzt, dass der gesamte Messbereich symmetrisch um den Arbeitsabstand liegt $o_0 \pm \Delta o_{max}$ und ein Signal zweimal das Messrauschen betragen muss, um aufgelöst werden zu können. Nun ergibt sich anhand der geführten Diskussion, dass der Dynamikbereich nur in Abhängigkeit der Systemparameter bestimmt werden kann. In den Abbildungen 61 und 62 zeigt sich, dass das Messrauschen linear mit Δo steigt $\overline{\sigma}_z \propto \Delta o$. Somit ergibt sich bei gleichbleibendem SNR und Korrelationsfenstergröße l_F ein vom betrachteten Höhenmessbereich unabhängiger Dynamikumfang. Aus Abbildung 61 kann beispielsweise ein Dynamikumfang von $DR \approx 200$ abgeleitet werden.

6.8 Zusammenfassung

Dargestellt wurde eine umfangreiche messtechnische Analyse eines hochauflösenden Stereozeilenkamerasystems. Insbesondere wurde hierbei Wert gelegt auf die durch Messdaten gestützte begriffliche Erweiterung der objektseitigen Schärfentiefe. Diese wurde hier als eine frequenzabhängige Größe betrachtet und analysiert. Es wurde ein Verfahren erarbeitet, welches es ermöglicht die Änderung der MTF und somit die Schärfentiefe als messtechnische Größe frequenzabhängig über das gesamte Messvolumen zu charakterisieren. Hierzu wird die relative Änderung der Fouriertransformierten des Bildsignals analysiert. Aus diesen Daten lässt sich ableiten, dass die Schärfentiefe in guter Näherung linear mit der betrachteten Wellenlänge λ_o ansteigt. Im Zusammenhang mit lokalen Korrelationsalgorithmen zur Bestimmung der Disparität lässt sich somit der Höhenmessbereich Δo_{max} über die Größe des eingesetzten Korrelationsfensters l_F definieren. Des Weiteren erlauben diese Betrachtungen die Analyse der Bildfeldwölbung der sagittalen und meridionalen Komponente, welche relevant für eine zusätzliche

Tiefpasswirkung auf die Bilddaten ist. Hier hat sich gezeigt, dass das Messrauschen $\overline{\sigma}_z$ keine ersichtliche Abhängigkeit entlang der Sensorposition aufweist. Dies wiederum führt zu dem Schluss, dass die bestimmte Variation der *MTF* entlang der Sensorzeile keine negative Auswirkung auf das Messrauschen der 3D-Messung zeigt.

Die komplexen Abhängigkeiten des Messrauschens wurde detailliert untersucht und diskutiert. Das Messrauschen hängt stark von der Tiefpasswirkung durch die Defokussierung und der Korrelationsfenstergröße ab. Hingegen zeigt sich, dass das Signalrauschen der Bilddaten selber nur einen sekundären Einfluss auf das Messrauschen hat. Insbesondere im Extremfall kleiner Korrelationsfenster am Rande des Höhenmessbereiches wirkt sich das Rauschen der Bilddaten auf die Messdaten verstärkt negativ aus. Das Messrauschen lässt sich nicht in einer einfachen analytischen Abhängigkeit beschreiben. Es wird daher vorgeschlagen, auf Basis der Messdaten ein empirisches Modell durch Regression zu erstellen. Dieses ermöglicht es, das Messrauschen zu gegebenen Parametern zu bestimmen.

7 Diskussion

Bei der Analyse und Diskussion der multispektralen Zeilenkamera, sowie bei der Behandlung der Stereo-Zeilenkamera, muss darauf hingewiesen werden, dass die Messgenauigkeit der kamerabasierten Verfahren generell nicht allgemeingültig auf einer einzelnen Probe bestimmt und auf andere übertragen werden kann. Es zeigt sich bei den Untersuchungen, dass aufgrund der indirekten Messverfahren, der Parameter-raum der Einflussfaktoren auf die kamerabasierte Messung sehr hoch ist. Daher wurden Methoden und Betrachtungsweisen entwickelt, welche eine applikationsspezifische Analyse der Messgenauigkeit der kamerabasierten Systeme ermöglichen. Das notwendige Verständnis und die Methodik zur Bewertung der multispektralen und der stereoskopischen Zeilenkamera decken sich in den wesentlichen Zügen. Der Grund liegt in der vergleichbaren technologischen Ausprägung. Beide Systeme bestehen aus einer Mehrzahl von Zeilenkameras, welche denselben Objektbereich erfassen. Die Bildinformationen der jeweiligen Teilkameras werden algorithmisch zu einem Messwert verarbeitet. Im Falle der multispektralen Zeilenkamera handelt es sich um vier Teilkameras (siehe Kapitel 2.2), die Stereo-Zeilenkamera weist hingegen zwei Teilkameras auf (siehe Kapitel 2.3).

Beide Systeme, bzw. Messverfahren unterscheiden sich allerdings wesentlich durch die Auswertung der Bilddaten und somit auch hinsichtlich der damit einhergehenden Einflussparameter auf den resultierenden Messwert. Die Teilkameras der multispektralen Zeilenkamera unterscheiden sich durch verschiedene optische Vorsatzfilter, welche zu verschiedenen spektralen Empfindlichkeiten der Teilkameras führen. Zur Ableitung eines Farbmesswertes wird die Amplitude des Bildsignals aller zwölf Kanäle analysiert.

Die beiden Teilkameras der Stereo-Zeilenkamera unterscheiden sich hingegen durch die verschiedenen Betrachtungswinkel. Die unterschiedlichen Betrachtungswinkel führen zu einer verschiedenen geometrischen, räumlichen Lage der Informationen im Bild. Im Falle der Stereo-Zeilenkamera wird somit im weitesten Sinne die Lage der Bildinformationen ausgewertet, um die 3D-Messwerte abzuleiten.

Zusammenfassend besteht die Ähnlichkeit der behandelten Systeme in der optischen und elektronischen Ausführung. Die Methoden der jeweiligen Datenauswertung verhalten sich dabei komplementär. Einzelne Komponenten der in der vorliegenden Arbeit ausgearbeiteten Methoden zur Qualifizierung von Zeilenkameras als Messgerät können für weitere, zukünftig zu betrachtende Systeme ausgewählt und kombiniert werden.

Das Messrauschen stellt für jegliche Art der Prozesskontrolle die wesentliche Eigenschaft eines Messgerätes dar. Um das Messrauschen der zeilenkamerabasierten Systeme grundlegend verstehen zu können, ist die genaue Kenntnis der Eigenschaften des bildgebenden Zeilensensors von besonderer Bedeutung. Daher wurde der eingesetzte CCD-Zeilensensor eingehend nach dem EMVA 1288 Standard charakterisiert. Die Ergebnisse bilden die Basis für die Entwicklung eines Simulationsmodells zur Beschreibung der multispektralen Zeilenkamera, sowie zur Interpretation der Messergebnisse des Rauschens der 3D-Messung. Die Richtlinien und Ausführungen des EMVA 1288 Standards sind entwickelt worden, um Bildsensoren objektiv und vergleichbar charakterisieren zu können. Daher ist die Anwendung des EMVA 1288 Standards die ideale Grundlage für die Charakterisierung des CCD-Zeilensensors. Der Standard lässt allerdings einige Freiheiten bei der konkreten Realisierung des Messaufbaus zu. In der vorliegenden Arbeit wurde Wert auf die Stabilität der erhaltenen Messwerte gelegt. Daher wurde der Ansatz gewählt, das Kamerasignal über die Integrationszeit zu variieren. Dies ließ sich durch spezielle Kamerafunktionen der *Chromasens GmbH* elegant implementieren. Durch die Verwendung des speziellen Modus, kann der Aufbau allerdings nur für Kameras der *Chromasens GmbH* verwendet werden. Vergleichende Messungen mit Kameras anderer Hersteller sind daher nicht auf einfache Weise möglich. Die Linearität konnte mit einer Unsicherheit von $\approx 10^{-3}$ bestimmt werden und wird durch die Stabilität der Bestrahlungsstärke

über die Messzeit limitiert. Anhand der präzisen Messungen des Signalrauschens kann abgeleitet werden, dass das Schrotrauschen das Rauschen des Signals des CCD-Zeilensensors dominiert. Anhand der Messdaten wurde ein vom Betriebspunkt abhängiges Modell, welches das Rauschen des Bildsignals beschreibt, entwickelt.

Weiterhin wurde für das ganzheitliche Systemverständnis der multispektralen Zeilenkamera, und insbesondere deren Anwendung für farbmessstechnische Applikationen, ein Messverfahren zur präzisen Bestimmung der spektralen Empfindlichkeiten der zwölf Kamerakanäle entwickelt. Die gemessenen spektralen Empfindlichkeiten wurden auf einem Farbdatensatz unter Anwendung des linearen Kameramodells auf deren Plausibilität geprüft. Hierbei zeigte sich, dass das Signal der zwölf Kanäle bestimmt werden kann, jedoch nicht zu vernachlässigende Abweichungen auftreten. Daher wurde abgeleitet, dass die Messdaten der spektralen Empfindlichkeiten hinreichend genau sind, um im Rahmen einer Simulationsumgebung unter Verwendung des linearen Kameramodells Systemanalysen durchzuführen. Allerdings sind die Messdaten der spektralen Empfindlichkeiten als Basis für die Farbkalibrierung nicht hinreichend präzise. An dieser Stelle sollte zukünftig weiter an dem Messaufbau und der Datenauswertung gearbeitet werden.

Bei der Analyse der absoluten farbmétrischen Abweichungen zwischen den Farbmesswerten der multispektralen Zeilenkamera und den Farbmesswerten eines konventionellen Farbmessgerätes zeigte sich, dass bei einer Kalibrierung, auf dem Farbdatensatz der jeweiligen betrachteten Applikation, mittlere Farbfehler kleiner eins erhalten werden $\overline{\Delta E76} < 1$. Jedoch sind wesentliche Limitierungen gegeben, wenn die Kalibrierung auf einem anderen, nicht der Applikation entsprechenden Farbprobensatz bestimmt wird. In diesem Fall erhöht sich der mittlere Farbfehler auf $\overline{\Delta E76} \approx 1 - 2$. Die Untersuchung von Wyble und Rich [2007b] beweist, dass selbst konventionelle Farbmessgeräte verschiedener Hersteller, im direkten Vergleich zueinander, farbmétrische Abweichungen derselben Größenordnung aufweisen. Kritisch zu betrachten sind im Falle der multispektralen Zeilenkamera die maximalen gemessenen farbmétrischen Abweichungen von $\Delta E76_{max} \approx 2 - 6$. Für eine automatisierte Regelung eines färbenden Prozesses, sind diese maximalen farbmétrischen Abweichungen für einige Anwendungsfälle zu hoch. Die Arbeit von Eckhard [2015] zeigt, dass mit aufwendigeren algorithmischen Verfahren zur Rekonstruktion der Reflexionsspektren die Messgenauigkeit der multispektralen Zeilenkamera weiter verbessert werden kann. Jedoch zeigten die Ergebnisse der Messungen und der Simulationen, dass die Stabilität der Messergebnisse sehr gut sind, wenn das Messfeld (ROI), welches zur Ableitung eines Farbmesswertes herangezogen wird, hinreichend groß gewählt wurde. Umfasst das ROI ca. 100 Pixel, weisen die Wiederholmessungen stabile Ergebnisse auf. In diesem Fall limitieren systematische Abweichungen. Das Messrauschen kann somit vernachlässigt werden.

Die Simulationen der multispektralen Zeilenkamera führen zu wesentlichen Erkenntnissen hinsichtlich der Empfindlichkeit der Farbmessung gegenüber der verschiedenen möglichen Störeinflüsse. Die Farbmessung wird am stärksten beeinflusst durch Abweichungen des Dunkelsignals. Ergänzend zeigen die Messdaten ebenfalls, dass nicht zu vernachlässigende Wechselwirkungen benachbarter Messfelder auftreten. Die Wechselwirkungen können optisch wie auch im Sensor selber hervorgerufen werden. Diese bewirken vornehmlich eine Störung des Dunkelsignals. Die Auswirkungen der gemessenen Nichtlinearität des Sensors kann weitestgehend vernachlässigt werden. Aus den Simulationen geht weiterhin hervor, dass das Messrauschen ab einer Kantenlänge des ROI von 50 Pixeln vollständig vernachlässigt werden kann. Prinzipiell zeigen die Simulationen unter Berücksichtigung der Digitalisierung des Signals, der Nichtlinearität und des Signalrauschens bessere farbmétrische Ergebnisse als die realen Messdaten. Daher kann abgeleitet werden, dass mit aller Wahrscheinlichkeit die systematischen Restfehler durch Störungen des Dunkelsignals verursacht werden.

Im Rahmen der wissenschaftlichen Untersuchung der Stereo-Zeilenkamera wurde die Änderung der *MTF* beider Teilkameras über das Messvolumen mittels Fouriertransformation eines stochastischen Bildinhaltes vermessen. Diese Herangehensweise zeigt ihre Stärke darin, dass über die Sensorposition hin-

weg, in beiden Raumrichtungen der Bildebene, die Änderung der MTF über einen großen Frequenzbereich vermessen werden kann. Hierdurch lassen sich die Bildfeldwölbung, der Astigmatismus, der Farblängsfehler und der Überlapp der Fokusebenen der beiden Teilkameras sehr genau charakterisieren. Das erwartete frequenzabhängige lineare Verhalten der Schärfentiefe konnte durch die Messungen bestätigt werden. Die Analyse der MTF der einzelnen Farbkanäle ermöglicht eine präzise Vermessung des Farblängsfehlers der eingesetzten Objektive. Der Vergleich der Lage der Maxima der beiden Teilkameras zueinander ermöglicht die präzise Bestimmung der Justage der Teilkameras. Es konnte gezeigt werden, dass innerhalb der Genauigkeit der Auswertung, die beiden Teilkameras ideal übereinstimmen und somit das Messvolumen der Stereo-Zeilenkamera maximiert wurde.

Zur genauen Analyse des Einflusses der durch Defokussierung verringerten MTF auf die 3D-Messung, wurde nach OptAssyst [2016] das Messrauschen über das Messvolumen bestimmt. Weiterhin wurde in diesem Zusammenhang die Korrelationsfenstergröße und das Rauschen der Bilddaten variiert. Es zeigt sich, dass das Rauschen der 3D-Messung äußerst robust hinsichtlich des Rauschens der eingehenden Bilddaten ist. Allerdings zeigt die Defokussierung, und die damit einhergehende Reduzierung der MTF , einen starken Einfluss auf das Rauschen der 3D-Messung. Im Falle kleiner Korrelationsfenster hat das Rauschen der Bilddaten einen erhöhten Einfluss auf das Rauschen der 3D-Messung.

In einer weiteren Untersuchung wurde betrachtet, wie sich das Verhältnis der dominanten auf dem Objekt auftretenden Frequenz, im Verhältnis zur Korrelationsfenstergröße, auswirkt. Hierbei konnte abgeleitet werden, dass das Rauschen der 3D-Messung ein divergentes Verhalten aufweist, wenn die Wellenlänge der Modulation in dieselbe Größenordnung wie das Korrelationsfenster gelangt. Diese Erkenntnisse wurden verwendet, um die Messdaten des Rauschens der 3D-Messung unter Variation der Korrelationsfenstergröße zu interpretieren. Aus diesen Betrachtungen resultierte die Erkenntnis, dass die aus den Messungen der MTF abgeleitete Schärfentiefe in guter Näherung mit einer eintretenden Divergenz des Rauschens der 3D-Messung korreliert.

Wenn die Anforderung an das maximale zulässige Rauschen der 3D-Messung bekannt ist, kann der Höhenmessbereich und somit das Messvolumen des Systems aus den präsentierten Analysen abgeleitet werden. Aufgrund der komplexen Abhängigkeiten des Messrauschens von der Beschaffenheit der Objektoberfläche und der Parametrisierung der Algorithmen, muss jeweils eine applikationsspezifische Untersuchung vorgenommen werden. Beispielhaft kann abgeleitet werden, dass bei einem maximalen Rauschen der 3D-Messung von $\sigma_z = 1 \mu\text{m}$ der Höhenmessbereich etwa $\Delta o_{\text{max}} = 1 \text{ mm}$ beträgt. Da das Messrauschen in guter Näherung linear mit dem Abstand der Messebene zur idealen Objektweite ansteigt $\sigma_z \propto \delta o$, kann entsprechend der Anforderungen an das Messrauschen der maximale Höhenmessbereich Δo_{max} abgeschätzt werden.

Hinsichtlich der Geschwindigkeit und der Vielfältigkeit der Einsatzmöglichkeiten sind die kamerabasierten Messsysteme schwer zu übertreffen. Dennoch werden in vielen Bereichen Punktmesssensoren eingesetzt, da diese weniger kompliziert zu charakterisieren und zu stabilisieren sind. Die Erweiterung der Messung von einem Punkt auf die räumliche Dimension bringt, wie diese Arbeit zeigt, einige wissenschaftliche und technologische Herausforderungen mit sich. Es hat sich in vielen Diskussionen mit Anwendern gezeigt, dass ein substantieller Schritt darin liegt, Kamerasysteme als Messgeräte, beziehungsweise als Messsensoren zu verstehen. Die Integration einer als Messgerät eingesetzten Kamera verlangt somit ein ganzheitliches Verständnis der Applikation, in welcher die Kamera als Messgerät integriert werden soll. In diesem Zusammenhang müssen die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse auch aufgefasst werden. Die entwickelten Verfahren können eingesetzt werden, um ein zeilenkamerabasiertes Farb- oder 3D-Messsystem im Rahmen einer Integration, bzw. einer Applikation zu qualifizieren. Die in den vorliegenden Ausführungen bestimmten Werte können hierbei als beste zu erreichende Werte angenommen werden.



8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit umfasst drei thematische Teilbereiche. Der erste Abschnitt beinhaltet, angelehnt an den EMVA 1288 Standard [EMVA, 2010], die Behandlung der grundlegenden Funktionsweise und die messtechnische Charakterisierung der eingesetzten CCD-Zeilensensoren. Auf Basis dieser grundlegenden Messdaten und den damit zusammenhängenden Erkenntnissen über die Eigenschaften des CCD-Zeilensensors, werden zwei auf Zeilensensoren basierende Messsysteme betrachtet und Methoden zu deren Qualifizierung entwickelt. Die multispektrale Zeilenkamera sowie die Stereo-Zeilenkamera basieren jeweils auf einem Verbund von mehreren Teilkameras. Die Bildinformationen der Teilkameras werden eingesetzt, um Farb- bzw. 3D-Messdaten abzuleiten. Die Ähnlichkeit der Kamerasysteme und die Verwendung desselben CCD-Zeilensensor in beiden Systemen legen die gemeinsame Behandlung nahe. Die Messverfahren ergänzen sich in dem Sinne, dass im Rahmen der Qualifizierung der multispektralen Zeilenkamera die Amplitude des Bildsignals analysiert wird. Hingegen im Falle der 3D-Messung wird die geometrische Lage der Bildinformationen und die Modulation, bzw. die *MTF* des optischen Systems analysiert.

Im Rahmen der Untersuchung der multispektralen Zeilenkamera wird ein Messverfahren zur Charakterisierung der spektralen Systemempfindlichkeiten entwickelt und die Datenauswertung detailliert dargestellt. Auf Basis der erhaltenen Messdaten wird im Zusammenhang mit der Charakterisierung des zu Grunde liegenden Zeilensensors ein messdatengestütztes Modell entwickelt, welches nach der Durchführung eines Konsistenztests zur Sensitivitätsanalyse des Farbmesssystems herangezogen wird. Es wird weiterhin untersucht, wie stark sich zu erwartende Messfehler, verursacht durch verschiedene Einflüsse im Pfad der Datenerfassung, auf die farbmetrische Messgenauigkeit auswirken. Hierbei werden das Schrotrauschen, unter Berücksichtigung der Messfeldgröße, Instabilitäten des Dunkelsignals und des Weißpunktes sowie die Nichtlinearität des Signals des CCD-Zeilensensors berücksichtigt. Die erhaltenen, auf Simulationen basierenden Daten, werden in Relation gesetzt zu applikationsnahen Messdaten. Weiterhin werden die Grenzen und die Möglichkeiten zur erweiterten Systemanalyse eines einfachen linearen Kalibrierverfahrens aufgezeigt. Insbesondere wird die Übertragbarkeit und die damit zusammenhängende Allgemeingültigkeit des Kalibrierverfahrens untersucht.

Weitergehende Untersuchungen sollten angestellt werden, um die Unzulänglichkeiten der gemessenen spektralen Systemempfindlichkeiten der multispektralen Zeilenkamera zu untersuchen. Die Messmethode sollte in diesem Zuge weiterentwickelt und optimiert werden. Ein weiterer Ansatz liegt in der kritischen Betrachtung, bzw. der Erweiterung des in dieser Arbeit verwendeten linearen Kameramodells. Derzeit ist nicht bekannt, wie stark die messtechnischen Abweichungen durch die nicht streng eingehaltene Messgeometrie $45^\circ \alpha : 0^\circ$ des Kamerasystems im Zusammenspiel mit der realen *BRDF* der jeweiligen Objektoberfläche ausfällt. Die Arbeit von Auer [2015] belegt durch experimentelle Untersuchungen, dass verschiedene Probenoberflächen verschiedenes Verhalten in der kamerabasierten Farbmessung zur Folge haben. Um diese Untersuchungen weiterzuführen wird derzeit (07/2015- 06/2018) das Projekt *Rekonstruktion orts aufgelöster Farbspektren* in Kooperation mit der Arbeitsgruppe *Datenanalyse und Messunsicherheit*, 8.4 der *Physikalisch Technischen Bundesanstalt* (PTB) von der *Chromasens GmbH* durchgeführt. Hier werden weitere algorithmische Methoden und eine Simulationsumgebung entwickelt, welche insbesondere einem tieferen Verständnis der geometrischen Abhängigkeiten der zeilenkamerabasierten Farbmessung dienen soll. Jedoch muss an dieser Stelle betont werden, dass insbesondere das lineare Kameramodell die in dieser Arbeit durchgeführte Konsistenzanalyse der Kalibrierung und der Messung der spektralen Empfindlichkeiten ermöglicht.

Im Rahmen der Charakterisierung und der Untersuchung der Stereo-Zeilenkamera wird im Wechselspiel mit dem lokalen Korrelationsalgorithmus der Begriff der Schärfentiefe erweitert. Die Schärfentiefe wird behandelt als ein von der Objektweite abhängiger Tiefpassfilter, dessen Wirkung im Zusammenhang mit der Struktur auf dem zu erfassenden Objekt und der Ausdehnung des Suchfensters betrachtet werden muss. Mittels Fouriertransformation wird aus einem stochastischen Muster, welches zu verschiedenen Objektweiten aufgenommen wurde, die frequenzabhängige Schärfentiefe experimentell bestimmt. Das Rauschen der 3D-Messung in Abhängigkeit von der auf dem Objekt vorherrschenden Modulationsfrequenz und der Größe des Korrelationsfensters wird ebenfalls untersucht. Es zeigt sich ein starker Anstieg des Messrauschens, wenn ein kritisches Verhältnis zwischen der Korrelationsfenstergröße und der dominanten Modulationsfrequenz unterschritten wird. Die Untersuchung zeigt, dass zumindest eine vollständige Modulation in einem Korrelationsfenster zu liegen kommen muss, um robuste 3D-Messergebnisse zu erhalten.

Weiterhin wird das Messrauschen des Stereosystems in Abhängigkeit von der Defokussierung, der Größe des Korrelationsfensters, der Sensorposition und vom Rauschen der Bilddaten untersucht. Es zeigt sich eine unerwartete Robustheit der 3D-Messung hinsichtlich einer starken Variation des Rauschens der Bilddaten. Jedoch bei zunehmender Defokussierung nimmt der Einfluss des Rauschens der Bilddaten auf das Rauschen der 3D-Messung stark zu. Daher hat das Rauschen der Bilddaten eine direkte Auswirkung auf die Dynamik des Messsystems, da bei einem geringerem Rauschen der Bilddaten der Höhenmessbereich erweitert werden kann. Aus den Betrachtungen lässt sich ein empirisches Modell bestimmen, welches es ermöglicht applikationsspezifisch das Messrauschen und somit das Auflösungsvermögen der 3D-Messung abzuleiten. Jedoch muss in Abhängigkeit der auftretenden Modulationsfrequenzen der Objektoberfläche eine messtechnische Charakterisierung des Messrauschens durchgeführt werden. Die Ergebnisse lassen sich nicht direkt übertragen, jedoch die Auswerte- und Analyseverfahren. Die in dieser Arbeit ermittelten Werte können als Referenz für die Abschätzung der besten zu erzielenden Werte herangezogen werden, da diese weitestgehend unter idealen Bedingungen ermittelt wurden. Ein starker Anstieg des Messrauschens in Abhängigkeit von der Defokussierung und dem Korrelationsfenster, konnte in Zusammenhang mit der gemessenen frequenzabhängigen Schärfentiefe gebracht werden.

Das vorgestellte Verfahren zur Messung der relativen Änderung der *MTF* ermöglicht es nicht, die absolute Amplitude der *MTF* abzuleiten. Es ist allerdings möglich, durch lithografische Verfahren ein an den QA62 angelehntes Testmuster zu erzeugen. Dieses könnte an einigen Stellen des Messvolumens vermessen werden. Mit diesen einzelnen Stützstellen könnten, die in dieser Arbeit präsentierten relativen Daten der *MTF*, auf eine absolute Messung korrigiert werden. Somit könnte das Rauschen der 3D-Messung auf einer spezifischen Probe nicht nur hinsichtlich der Veränderungen der *MTF* betrachtet werden, sondern auch zu dessen absoluten Wert in Relation gebracht werden.

Die in dieser Arbeit abgeleiteten Ergebnisse beziehen sich lediglich auf das Korrelationsverfahren. Es ist zu erwarten, dass andere Verfahren verschieden auf die Defokussierung, bzw. die starke Verringerung der *MTF* reagieren. Hierzu wären weitergehende wissenschaftliche Untersuchungen interessant. Möglicherweise reagieren andere lokale Rekonstruktionsverfahren weniger sensibel auf die reduzierte *MTF*. Auch wäre es spannend zu betrachten, wie globale Rekonstruktionsverfahren auf die Defokussierung reagieren.

Aufgrund der starken Abhängigkeit der korrelationsbasierten 3D-Messung vom Kontrast der Objektoberfläche wäre es hilfreich, eine Simulationsumgebung zu entwickeln, welche das Rauschen der Bilddaten und die Defokussierung berücksichtigt. Hiermit wäre es zukünftig möglich den Kontrast auf dem Objekt $O(x, y)$ präzise zu kontrollieren und die genauen Abhängigkeiten des Messrauschens genauer zu studieren. Im Rahmen einer studentischen Arbeit [Ahrens, 2017], welche sich mit einem Verfahren zur Vermessung von spiegelnden Oberflächen beschäftigt, wird derzeit ein Simulationsmodell der Stereo-Zeilenkamera entwickelt, welches für zukünftigen Analysen herangezogen werden kann.

Aufgrund des starken Wachstums des Marktes für 3D-messtechnische Applikationen ist zu erwarten, dass die vorgestellten Themen im Rahmen der Entwicklungstätigkeiten der *Chromasens GmbH* weitergeführt werden.

Literaturverzeichnis

- [3Dsensation 2016] 3DSENSATION: KATALOG DER SENSORDATENBLÄTTER / 3Dsensation Mensch. Maschine. Umwelt. ZUKUNFT. URL [http://www.3d-sensation.de/content/dam/3dsensation/de/documents/3Ds_Katalog_der_Sensordatenblaetter_\(V280928\).pdf](http://www.3d-sensation.de/content/dam/3dsensation/de/documents/3Ds_Katalog_der_Sensordatenblaetter_(V280928).pdf), 2016. – Forschungsbericht. Online-Zugriff: 16.06.2017
- [Agranov u. a. 2003] AGRANOV, Gennadiy ; BEREZIN, Vladimir ; TSAI, Richard H.: Crosstalk and micro-lens study in a color CMOS image sensor. In: *IEEE Transactions on Electron Devices* 50 (2003), Nr. 1, S. 4–11
- [Ahrens 2017] AHRENS, Tobias: *Stereoskopische Vermessung von Topographien spiegelnder Oberflächen*, Hochschule Mannheim, Masterarbeit, 2017
- [Anderson und Bedin 2010] ANDERSON, Jay ; BEDIN, Luigi R.: An Empirical Pixel-Based Correction for Imperfect CTE. I. HST's Advanced Camera for Surveys1. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 122 (2010), Nr. 895, S. 1035–1064
- [Andersson u. a. 1987] ANDERSSON, Stefan P ; MONTAN, Sune ; SVANBERG, Sune: Multispectral system for medical fluorescence imaging. In: *IEEE journal of quantum electronics* 23 (1987), Nr. 10, S. 1798–1805
- [ASTM-E12 2006] ASTM-E12: *ASTM E2214-02 Standard Practice for Specifying and Verifying the Performance of Color-Measuring Instruments*. 06 2006
- [Auer 2015] AUER, P: *Untersuchung und Optimierung der zeilenkamerabasierten spektralen Farbmessung bei Proben mit unterschiedlicher Streucharakteristik*, Hochschule Aalen - Technik und Wirtschaft Fakultät Optik und Mechatronik, Bachelorarbeit, 2015
- [Barbour und Schmidt 2001] BARBOUR, Neil ; SCHMIDT, George: Inertial sensor technology trends. In: *IEEE Sensors journal* 1 (2001), Nr. 4, S. 332–339
- [Bass u. a. 2001] BASS, Michael ; VAN STRYLAND, Eric W. ; WILLIAMS, David R. ; WOLFE, William L.: *Handbook of optics*. Bd. 1. 2. McGraw-Hill, 2001
- [Bianconi u. a. 2013] BIANCONI, Francesco ; FERNÁNDEZ, Antonio ; GONZÁLEZ, Elena ; SAETTA, Stefano A.: Performance analysis of colour descriptors for parquet sorting. In: *Expert Systems with Applications* 40 (2013), Nr. 5, S. 1636–1644
- [Blais 2004] BLAIS, François: Review of 20 years of range sensor development. In: *Journal of Electronic Imaging* 13 (2004), Nr. 1
- [Bogue 2013] BOGUE, Robert: Recent developments in MEMS sensors: A review of applications, markets and technologies. In: *Sensor Review* 33 (2013), Nr. 4, S. 300–304
- [Boyle und Smith 1974] BOYLE, W ; SMITH, G: *Buried channel charge coupled devices*. Februar 12 1974. – US Patent 3,792,322
- [Boyle 2010] BOYLE, Willard S.: Nobel Lecture: CCD - An extension of man's view*. In: *Rev. Mod. Phys.* 82 (2010), Aug, S. 2305–2306. – URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.82.2305>. – Online-Zugriff: 16.06.2017

-
- [Boyle und Smith 1970] BOYLE, Williard S. ; SMITH, George E.: Charge coupled semiconductor devices. In: *Bell System Technical Journal* 49 (1970), Nr. 4, S. 587–593
- [Bračun und Sluga 2015] BRAČUN, Drago ; SLUGA, Alojzij: Stereo vision based measuring system for online welding path inspection. In: *Journal of Materials Processing Technology* 223 (2015), S. 328–336
- [Brogårdh 2007] BROGÅRDH, Torgny: Present and future robot control development - An industrial perspective. In: *Annual Reviews in Control* 31 (2007), Nr. 1, S. 69–79
- [Brown und MacAdam 1949] BROWN, Walter Redvers J. ; MACADAM, DL: Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences. In: *JOSA* 39 (1949), Nr. 10, S. 808–834
- [Burns 2000] BURNS, Peter D.: Slanted-edge MTF for digital camera and scanner analysis. In: *IS and T PICS Conference SOCIETY FOR IMAGING SCIENCE & TECHNOLOGY* (Veranst.), 2000, S. 135–138
- [Burns 2015] BURNS, Peter D.: *sfrmat3: SFR evaluation for digital cameras and scanners*. 05 2015. – URL http://losburns.com/imaging/software/SFRedge/sfrmat3_post/index.html. – Online-Zugriff: 16.06.2017
- [Chang u. a. 2012] CHANG, Moon-Hwan ; DAS, Diganta ; VARDE, PV ; PECHT, Michael: Light emitting diodes reliability review. In: *Microelectronics Reliability* 52 (2012), Nr. 5, S. 762–782
- [ChromasensGmbH 2015] CHROMASENSGMBH: *3D-Bilderfassungssystem für die Zuginspektion*. online. 10 2015. – URL <http://www.inspect-online.com/topstories/vision/3d-bilderfassungssystem-fuer-die-zuginspektion>. – Online-Zugriff: 16.06.2017
- [ChromasensGmbH 2017] CHROMASENSGMBH: *Internetseite der Chromasens GmbH*. online. 06 2017. – URL <https://www.chromasens.de/>. – Online-Zugriff: 16.06.2017
- [Chugui u. a. 2013] CHUGUI, Yu ; VERKHOGLYAD, A ; POLESHCHUK, A ; KOROLKOV, V ; SYSOEV, E ; ZAVYALOV, P: 3D Optical Measuring Systems and Laser Technologies for Scientific and Industrial Applications. In: *Measurement Science Review* 13 (2013), Nr. 6, S. 322–328
- [CIE 1978] CIE: Recommendations on uniform colour spaces, colour difference equations and psychometric colour terms. In: *Commission Internationale de l'Eclairage* (1978)
- [CIE 2001] CIE: Improvement to Industrial Colour Difference Evaluation / Commission Internationale De l'Eclairage. 2001. – Forschungsbericht
- [CIE 2004] CIE: Technical Report Colorimetry CIE15:2004 / Comission Internationale De l'Eclairage. 2004 (3). – Forschungsbericht
- [CIE 2016] CIE: *Selected Colorimetric Tables*. 10 2016. – URL <http://www.cie.co.at/>
- [CIE u. a. 2004] CIE ; CARTER, E. C. ; OHNO, Y. ; POINTER, M. R. ; ROBERTSON, A. R. ; R., Sève ; D., Schanda J. ; WITT, K.: Technical Report Colorimetry CIE 15:2004: Colorimetry. In: *Commission Internationale de l'Eclairage* (2004)
- [CIE 1932] CIE, CIE: *Commission Internationale de l'Eclairage Proceedings, 1931*. 1932
- [DALSA 2011] DALSA, Teledyne: The Evolution of CMOS Imaging Technology / Teledyne DALSA. URL https://www.teledynedalsa.com/public/mv/appnotes/EvolutionofCMOS_Technology_wp.pdf, 2011. – White Paper. Online-Zugriff: 16.06.2017
- [DALSA 2017] DALSA, Teledyne: *CCD vs. CMOS*. Online. 2017. – URL <https://www.teledynedalsa.com/imaging/knowledge-center/appnotes/ccd-vs-cmos/>. – Online-Zugriff: 16.06.2017

-
- [Dargahi und Najarian 2005] DARGAHI, Javad ; NAJARIAN, Siamak: Advances in tactile sensors design/manufacturing and its impact on robotics applications—a review. In: *Industrial Robot: An International Journal* 32 (2005), Nr. 3, S. 268–281
- [Davis u. a. 2002] DAVIS, Curtiss O. ; BOWLES, Jeffrey ; LEATHERS, Robert A. ; KORWAN, Dan ; DOWNES, T V. ; SNYDER, William A. ; RHEA, W J. ; CHEN, Wei ; FISHER, John ; BISSETT, W P u. a.: Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration. In: *Optics Express* 10 (2002), Nr. 4, S. 210–221
- [Deck und De Groot 1994] DECK, Leslie ; DE GROOT, Peter: High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry. In: *Applied optics* 33 (1994), Nr. 31, S. 7334–7338
- [Demtröder 2005] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Experimentalphysik 3 Atome, Moleküle und Festkörper*. Bd. 3. 3. Springer-Verlag, 2005
- [DiCarlo und Wandell 2003] DICARLO, Jeffrey M. ; WANDELL, Brian A.: Spectral estimation theory: beyond linear but before Bayesian. In: *JOSA A* 20 (2003), Nr. 7, S. 1261–1270
- [Dierl u. a. 2016] DIERL, Marcel ; ECKHARD, Timo ; FREI, Bernhard ; KLAMMER, Maximilian ; EICHSTÄDT, Sascha ; ELSTER, Clemens: Improved estimation of reflectance spectra by utilizing prior knowledge. In: *JOSA A* 33 (2016), Nr. 7, S. 1370–1376
- [Dolezalek und Kraushaar 2005] DOLEZALEK, Friedrich ; KRAUSHAAR, Andreas: Forschungsbericht Nr. 52.034 Korrektur von Messfehlern bei Farbmessgeräten / FOGRA. 07 2005. – Forschungsbericht
- [Eckhard 2015] ECKHARD, T.: *Design considerations for line-scan multi-spectral imaging systems Application in reflectance and color measurements*, Universidad de Granada, Dissertation, 2015. – URL <http://digibug.ugr.es/bitstream/10481/42789/1/24942960.pdf>. – Online-Zugriff: 16.06.2017
- [Eckhard u. a. 2014] ECKHARD, Timo ; VALERO, Eva M. ; HERNÁNDEZ-ANDRÉS, Javier ; HEIKKINEN, Ville: Evaluating logarithmic kernel for spectral reflectance estimation - effects on model parametrization, training set size, and number of sensor spectral channels. In: *JOSA A* 31 (2014), Nr. 3, S. 541–549
- [Einstein 1905] EINSTEIN, Albert: Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. In: *Annalen der physik* 322 (1905), Nr. 6, S. 132–148
- [EMVA 2010] EMVA: EMVA Standard 1288 - Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras. 3 (2010), 11, Nr. 1, S. 1–36. – URL <http://www.emva.org>
- [Faugeras u. a. 1993] FAUGERAS, Olivier ; HOTZ, Bernard ; MATHIEU, Hervé ; VIÉVILLE, Thierry ; ZHANG, Zhengyou ; FUA, Pascal ; THÉRON, Eric ; MOLL, Laurent ; BERRY, Gérard ; VUILLEMIN, Jean u. a.: Real time correlation-based stereo: algorithm, implementations and applications / Inria. 1993. – Forschungsbericht
- [Filip und Haindl 2009] FILIP, Jiří ; HAINDL, Michal: Bidirectional texture function modeling: A state of the art survey. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 31 (2009), Nr. 11, S. 1921–1940
- [Fore 2010] FORE, LB: Reduction of peak-locking errors produced by Gaussian sub-pixel interpolation in cross-correlation digital particle image velocimetry. In: *Measurement Science and Technology* 21 (2010), Nr. 3, S. 035402
- [Francis 1995] FRANCIS, FJ: Quality as influenced by color. In: *Food quality and preference* 6 (1995), Nr. 3, S. 149–155
-

-
- [Fullerton u. a. 2011] FULLERTON, S. ; BENNET, K. ; TODA, E. ; TAKAHASHI, T.: ORCA-flash4.0 changing the Game / Hamamatsu Photonics K.K., Systems Division. 2011. – Forschungsbericht
- [Gat 2000] GAT, Nahum: Imaging spectroscopy using tunable filters: a review. In: *AeroSense 2000* International Society for Optics and Photonics (Veranst.), 2000, S. 50–64
- [Godau u. a. 2013] GODAU, C ; KLAMMER, M ; ECKHARD, T ; SCHNITZLEIN, M ; NOWACK, D ; FREI, B ; URBAN, P: Evaluation of a multi-spectral camera system for inline color measurement. In: *Annual meeting of the German Colour Group*, 2013
- [Golnabi und Asadpour 2007] GOLNABI, H ; ASADPOUR, A: Design and application of industrial machine vision systems. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23 (2007), Nr. 6, S. 630–637
- [Golub und Reinsch 1970] GOLUB, Gene H. ; REINSCH, Christian: Singular value decomposition and least squares solutions. In: *Numerische mathematik* 14 (1970), Nr. 5, S. 403–420
- [Gowen u. a. 2007] GOWEN, AA ; O'DONNELL, CPo ; CULLEN, PJ ; DOWNEY, G ; FRIAS, JM: Hyperspectral imaging—an emerging process analytical tool for food quality and safety control. In: *Trends in Food Science & Technology* 18 (2007), Nr. 12, S. 590–598
- [Guild 1932] GUILD, John: The colorimetric properties of the spectrum. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* 230 (1932), S. 149–187
- [Gupta und Cho 2010] GUPTA, Raj K. ; CHO, Siu-Yeung: Real-time stereo matching using adaptive binary window. In: *Proc. 3DPVT, Session 2* (2010), S. 1–8
- [Hagen und Kudenov 2013] HAGEN, Nathan ; KUDENOV, Michael W.: Review of snapshot spectral imaging technologies. In: *Optical Engineering* 52 (2013), Nr. 9, S. 090901–090901
- [Haller und Nedevschi 2012] HALLER, Istvan ; NEDEVSCI, Sergiu: Design of interpolation functions for subpixel-accuracy stereo-vision systems. In: *IEEE Transactions on image processing* 21 (2012), Nr. 2, S. 889–898
- [Han u. a. 2013] HAN, Jungong ; SHAO, Ling ; XU, Dong ; SHOTTON, Jamie: Enhanced computer vision with microsoft kinect sensor: A review. In: *IEEE transactions on cybernetics* 43 (2013), Nr. 5, S. 1318–1334
- [Hannavy 2013] HANNAVY, John: *Encyclopedia of nineteenth-century photography*. Routledge, 2013
- [Happel u. a. 2014] HAPPEL, Kathrin ; DÖRSAM, Edgar ; URBAN, Philipp: Measuring isotropic subsurface light transport. In: *Optics express* 22 (2014), Nr. 8, S. 9048–9062
- [Hardeberg 2002] HARDEBERG, Jon Y.: On the spectral dimensionality of object colours. In: *Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision* Bd. 2002 Society for Imaging Science and Technology (Veranst.), 2002, S. 480–485
- [Heikkinen u. a. 2007] HEIKKINEN, Ville ; JETSU, Tuija ; PARKKINEN, Jussi ; HAUTA-KASARI, Markku ; JAASKELAINEN, Timo ; LEE, Seong D.: Regularized learning framework in the estimation of reflectance spectra from camera responses. In: *JOSA A* 24 (2007), Nr. 9, S. 2673–2683
- [Heikkinen u. a. 2008] HEIKKINEN, Ville ; LENZ, Reiner ; JETSU, Tuija ; PARKKINEN, Jussi ; HAUTA-KASARI, Markku ; JÄÄSKELÄINEN, Timo: Evaluation and unification of some methods for estimating reflectance spectra from RGB images. In: *JOSA A* 25 (2008), Nr. 10, S. 2444–2458
- [Heisenberg 1927] HEISENBERG, Werner: Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. In: *Zeitschrift für Physik* 43 (1927), Nr. 3-4, S. 172–198

-
- [Hermann und Klette 2008] HERMANN, Simon ; KLETTE, Reinhard: *The naked truth about cost functions for stereo matching*. Citeseer, 2008
- [Herzog und Hill 2003] HERZOG, Patrick G. ; HILL, Bernhard: Multispectral imaging and its applications in the textile industry and related fields. In: *PICS*, 2003, S. 258–263
- [Hobbs 2009] HOBBS, Philip C.: *Building electro-optical systems - making it all work*. 2. John Wiley & Sons, 2009
- [Hollingsworth 2012] HOLLINGSWORTH, M.: *Konzeption und Realisierung eines Prüfstandes zur Bewertung der Bildqualität einer industriellen Farbzeilenkamera nach EMVA1288*, Hochschule Konstanz Technik, Wirtschaft und Gestaltung, Masterarbeit, July 2012
- [Hong u. a. 2001] HONG, Guowei ; LUO, M R. ; RHODES, Peter A.: A study of digital camera colorimetric characterisation based on polynomial modelling. In: *COLOR research and application* (2001), S. 76–87
- [Hosni u. a. 2011] HOSNI, Asmaa ; BLEYER, Michael ; RHEMANN, Christoph ; GELAUTZ, Margrit ; ROTHER, Carsten: Real-time local stereo matching using guided image filtering. In: *2011 IEEE International Conference on Multimedia and Expo IEEE* (Veranst.), 2011, S. 1–6
- [IFRA 2002] IFRA: Ifra Special Report 3.35 Possibilities for the automatic control of colour print quality / IFRA. 2002. – Forschungsbericht
- [ISO12647 2004] ISO12647: *ISO12647-1:2004(E) Graphic technology - Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints - Part 1: Parameters and measurement methods*. 2004
- [ISO13655 2009] ISO13655: *ISO 13655 Graphic technology - Spectral measurement and colorimetric computation for graphic arts images*. 2009
- [Jähne 2012] JÄHNE, Bernd: *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung*. 7. Springer-Verlag, 2012
- [Javidi und Tajahuerce 2000] JAVIDI, Bahram ; TAJAHUERCE, Enrique: Three-dimensional object recognition by use of digital holography. In: *Optics Letters* 25 (2000), Nr. 9, S. 610–612
- [Jordan u. a. 1998] JORDAN, Hans-Joachim ; WEGNER, M ; TIZIANI, H: Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy. In: *Measurement Science and Technology* 9 (1998), Nr. 7, S. 1142
- [Kaya 2015] KAYA, Bulent: Surface roughness inspection in milling operations with photometric stereo and PNN. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 81 (2015), Nr. 5-8, S. 1215–1222
- [Küng u. a. 2007] KÜNG, A ; MELI, F ; THALMANN, R: Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe. In: *Measurement Science and Technology* 18 (2007), Nr. 2, S. 319
- [Lee u. a. 2013] LEE, Zucheul ; JUANG, Jason ; NGUYEN, Truong Q.: Local disparity estimation with three-moded cross census and advanced support weight. In: *IEEE Transactions on Multimedia* 15 (2013), Nr. 8, S. 1855–1864
- [Lehn und Wegmann 2006] LEHN, Jürgen ; WEGMANN, Helmut: *Einführung in die Statistik*. Springer-Verlag, 2006
- [Levenson und Mansfield 2006] LEVENSON, Richard M. ; MANSFIELD, James R.: Multispectral imaging in biology and medicine: slices of life. In: *Cytometry part A* 69 (2006), Nr. 8, S. 748–758

-
- [Li u. a. 2016] LI, Jinjin ; BENNETT, Bonnie L. ; KARAM, Lina J. ; PETTINATO, Jeff S.: Stereo Vision Based Automated Solder Ball Height and Substrate Coplanarity Inspection. In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 13 (2016), Nr. 2, S. 757–771
- [Liang 2012] LIANG, Haida: Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation. In: *Applied Physics A* 106 (2012), Nr. 2, S. 309–323
- [Litfin 2005] LITFIN, Gerd: *Technische Optik in der Praxis*. 3. Springer, 2005
- [Litwiller 2001] LITWILLER, Dave: Ccd vs. cmos. In: *Photonics Spectra* 35 (2001), Nr. 1, S. 154–158
- [Loh und Lu 1999] LOH, Horng-Hai ; LU, Ming-Sing: Printed circuit board inspection using image analysis. In: *IEEE Transactions on industry applications* 35 (1999), Nr. 2, S. 426–432
- [Lu und Fei 2014] LU, Guolan ; FEI, Baowei: Medical hyperspectral imaging: a review. In: *Journal of biomedical optics* 19 (2014), Nr. 1, S. 010901–010901
- [Lu 2013] LU, Yingzi: *Spektral einstellbare Hochleistung - LED Zeilenbeleuchtung optimiert für die spektrale Farbmessung*, HTWG Konstanz, Masterarbeit, 2013
- [Luhmann 2000] LUHMANN, THOMAS: Photogrammetrische Verfahren in der industriellen Messtechnik. In: *Publikationen der DGPF* 9 (2000)
- [Luhmann 2010] LUHMANN, Thomas: *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. 3. Wichmann, 2010
- [Luhmann und Wendt 2000] LUHMANN, Thomas ; WENDT, Klaus: Recommendations for an acceptance and verification test of optical 3-D measurement systems. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33 (2000), Nr. B5/2; PART 5, S. 493–500
- [Lundström u. a. 2013] LUNDSTRÖM, Jens ; VERIKAS, Antanas ; TULLANDER, E ; LARSSON, B: Assessing, exploring, and monitoring quality of offset colour prints. In: *Measurement* 46 (2013), Nr. 4, S. 1427–1441
- [Luo u. a. 2001] LUO, M R. ; CUI, Guihua ; RIGG, B: The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. In: *Color Research & Application* 26 (2001), Nr. 5, S. 340–350
- [MacAdam 1942] MACADAM, David L.: Visual sensitivities to color differences in daylight. In: *JOSA* 32 (1942), Nr. 5, S. 247–274
- [Malamas u. a. 2003] MALAMAS, Elias N. ; PETRAKIS, Euripides G. ; ZERVAKIS, Michalis ; PETIT, Laurent ; LEGAT, Jean-Didier: A survey on industrial vision systems, applications and tools. In: *Image and vision computing* 21 (2003), Nr. 2, S. 171–188
- [Mann u. a. 2005] MANN, Christopher ; YU, Lingfeng ; LO, Chun-Min ; KIM, Myung: High-resolution quantitative phase-contrast microscopy by digital holography. In: *Optics Express* 13 (2005), Nr. 22, S. 8693–8698
- [Massey u. a. 2014] MASSEY, Richard ; SCHRABBACK, Tim ; CORDES, Oliver ; MARGGRAF, Ole ; ISRAEL, Holger ; MILLER, Lance ; HALL, David ; CROPPER, Mark ; PROD'HOMME, Thibaut ; NIEMI, Sami M.: An improved model of charge transfer inefficiency and correction algorithm for the Hubble Space Telescope. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 439 (2014), Nr. 1, S. 887–907
- [Mei u. a. 2013] MEI, Xing ; SUN, Xun ; DONG, Weiming ; WANG, Haitao ; ZHANG, Xiaopeng: Segment-tree based cost aggregation for stereo matching. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013, S. 313–320

-
- [Meyer-Spradow und Loviscach 2003] MEYER-SPRADOW, Jennis ; LOVISCACH, Jörn: Evolutionary design of BRDFs. In: *Eurographics Citeseer* (Veranst.), 2003, S. 301–306
- [Misimi u. a. 2007] MISIMI, E ; MATHIASSEN, JR ; ERIKSON, U: Computer vision-based sorting of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets according to their color level. In: *Journal of food science* 72 (2007), Nr. 1
- [Moers u. a. 2011] MOERS, AJM ; RIEL, Martin C. van ; Bos, Edwin J.: *Design and verification of the TriNano ultra precision CMM*. Universitätsbibliothek Ilmenau, 2011
- [Nakazawa und Samara 2014] NAKAZAWA, Takeshi ; SAMARA, Ayman: Three-dimensional inline inspection for substrate warpage and ball grid array coplanarity using stereo vision. In: *Applied optics* 53 (2014), Nr. 14, S. 3101–3109
- [Nayar und Nakagawa 1994] NAYAR, Shree K. ; NAKAGAWA, Yasuo: Shape from focus. In: *IEEE Transactions on Pattern analysis and machine intelligence* 16 (1994), Nr. 8, S. 824–831
- [Neugebauer 1937] NEUGEBAUER, Hans E.: Die theoretischen Grundlagen des Mehrfarbenbuchdrucks. In: *Zeitschrift für Wissenschaftliche Photographie Photophysik und Photochemie* 36 (1937), Nr. 4, S. 73–89
- [Nicodemus u. a. 1977] NICODEMUS, F.E. ; RICHMOND, J.C. ; HSIA, J.J ; GINSBERG, I.W. ; LIMPERIS, T.: *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*. Bd. 160. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1977
- [Nouira u. a. 2014] NOUIRA, H ; SALGADO, JA ; EL-HAYEK, N ; DUCOURTIEUX, S ; DELVALLÉE, A ; ANWER, N: Setup of a high-precision profilometer and comparison of tactile and optical measurements of standards. In: *Measurement Science and Technology* 25 (2014), Nr. 4, S. 044016
- [OptAssyst 2016] OPTASSYST: *Definition of A Comparable Data Sheet for Optical Surface Measurement Devices*. 04 2016. – URL <http://www.optassyst.de/fairedatenblatt/>. – Online-Zugriff: 16.06.2017
- [Osram 2017] OSRAM: *Osram Opto Semiconductors*. 2017. – URL http://www.osram-os.com/osram_os/en/products/product-catalog/led-light-emitting-diodes/oslon/index.jsp. – Online-Zugriff: 16.06.2017
- [Pantone 2017] PANTONE: *The PANTONE MATCHING SYSTEM and PANTONE FORMULA GUIDES*. online. 2017. – URL <https://www.pantone.com/pms-spot-color-information-formula-guides>. – Online-Zugriff: 16.06.2017
- [Pathare u. a. 2013] PATHARE, Pankaj B. ; OPARA, Umezuruike L. ; AL-SAID, Fahad Al-Julanda: Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. In: *Food and Bioprocess Technology* 6 (2013), Nr. 1, S. 36–60
- [Pawlowski 2012] PAWLOWSKI, Kai: *Untersuchungen zur Bestimmung der Farbdichte druckfrischer Offsetfarben mit einem Druckinspektionssystem*. Göttingen : Sierke Verlag, Januar 2012. – URL <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2761/>. – [Darmstadt, TU, Diss., 2010] Online-Zugriff: 16.06.2017
- [Penrose 1955] PENROSE, Roger: A generalized inverse for matrices. In: *Mathematical proceedings of the Cambridge philosophical society* Bd. 51 Cambridge Univ Press (Veranst.), 1955, S. 406–413
- [Peris u. a. 2012] PERIS, Martin ; MARTULL, Sara ; MAKI, Atsuto ; OHKAWA, Yasuhiro ; FUKUI, Kazuhiro: Towards a simulation driven stereo vision system. In: *Pattern Recognition (ICPR), 2012 21st International Conference on IEEE* (Veranst.), 2012, S. 1038–1042

- [Pimputkar u. a. 2009] PIMPUTKAR, Siddha ; SPECK, James S. ; DENBAARS, Steven P. ; NAKAMURA, Shuji: Prospects for LED lighting. In: *Nature Photonics* 3 (2009), Nr. 4, S. 180–182
- [Prayagi 2011] PRAYAGI, Paritosh: *Characterization of CCD line sensors for applications in the field of inline optical density measurement and spectral colour estimation*, Technische Universität Chemnitz Fakultät für Maschinenbau, Masterarbeit, 2011
- [Pu u. a. 2011] PU, Shi ; RUTZINGER, Martin ; VOSSELMAN, George ; ELBERINK, Sander O.: Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66 (2011), Nr. 6, S. S28–S39
- [Quinsat und Tournier 2012] QUINSAT, Yann ; TOURNIER, Christophe: In situ non-contact measurements of surface roughness. In: *Precision Engineering* 36 (2012), Nr. 1, S. 97–103
- [Rajagopalan u. a. 2004] RAJAGOPALAN, AN ; CHAUDHURI, Subhasis ; MUDENAGUDI, Uma: Depth estimation and image restoration using defocused stereo pairs. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 26 (2004), Nr. 11, S. 1521–1525
- [Rautenberg und Wiggenhagen 2002] RAUTENBERG, ULRICH ; WIGGENHAGEN, MANFRED: Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI 2634, Blatt 1. In: *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* (2002), S. 117–124
- [Ribes und Schmitt 2008] RIBES, Alejandro ; SCHMITT, Francis: Linear inverse problems in imaging. In: *Signal Processing Magazine, IEEE* 25 (2008), Nr. 4, S. 84–99
- [Rich und Martin 1999] RICH, Danny C. ; MARTIN, Denis: Improved model for improving the inter-instrument agreement of spectrophotometers. In: *Analytica chimica acta* 380 (1999), Nr. 2, S. 263–276
- [Robertson 1977] ROBERTSON, Alan R.: The CIE 1976 Color-Difference Formulae. In: *Color Research & Application* 2 (1977), Nr. 1, S. 7–11
- [Rolleston und Balasubramanian 1993] ROLLESTON, Robert ; BALASUBRAMANIAN, Raja: Accuracy of various types of Neugebauer model. In: *Color and Imaging Conference Bd. 1993* Society for Imaging Science and Technology (Veranst.), 1993, S. 32–37
- [Rondeaux u. a. 1996] RONDEAUX, Geneviève ; STEVEN, Michael ; BARET, Frederic: Optimization of soil-adjusted vegetation indices. In: *Remote sensing of environment* 55 (1996), Nr. 2, S. 95–107
- [Sansoni u. a. 2009] SANSONI, Giovanna ; TREBESCHI, Marco ; DOCCHIO, Franco: State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation. In: *Sensors* 9 (2009), Nr. 1, S. 568–601. – URL <http://www.mdpi.com/1424-8220/9/1/568/htm>. – Online-Zugriff: 16.06.2017
- [Schanda 2007] SCHANDA, János: *Colorimetry: understanding the CIE system*. John Wiley & Sons, 2007
- [Schlick 1994] SCHLICK, Christophe: An Inexpensive BRDF Model for Physically-based Rendering. In: *Computer graphics forum Bd. 13* Wiley Online Library (Veranst.), 1994, S. 233–246
- [SchneiderKreuznach 2016] SCHNEIDERKREUZNACH: *Schneider Kreuznach Objektive für industrielle Applikationen*. 2016. – URL <http://www.schneiderkreuznach.com/industrial-solutions/objektive-und-zubehoer/produkte/>. – Online-Zugriff: 16.06.2017
- [Schwabl 2006] SCHWABL, Franz: *Statistische Mechanik*. 3. Springer-Verlag, 2006
- [Shakespeare und Shakespeare 1999] SHAKESPEARE, Tarja ; SHAKESPEARE, John: Problems in colour measurement of fluorescent paper grades. In: *Analytica chimica acta* 380 (1999), Nr. 2, S. 227–242

-
- [Slater 1985] SLATER, Philip N.: Survey of multispectral imaging systems for earth observations. In: *Remote Sensing of Environment* 17 (1985), Nr. 1, S. 85–102
- [Stover 1995] STOVER, John C.: *Optical scattering: measurement and analysis*. Bd. 2. SPIE optical engineering press Bellingham, 1995
- [Szymanski und Stemmer 2015] SZYMANSKI, Charbel ; STEMMER, Marcelo R.: Automated PCB inspection in small series production based on SIFT algorithm. In: *Industrial Electronics (ISIE), 2015 IEEE 24th International Symposium on IEEE* (Veranst.), 2015, S. 594–599
- [Theuwissen 2008] THEUWISSEN, Albert J.: CMOS image sensors: State-of-the-art. In: *Solid-State Electronics* 52 (2008), Nr. 9, S. 1401–1406
- [Thorlabs 2017a] THORLABS: *Thorlabs Online PM100USB*. 2017. – URL <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PM100USB>. – Online-Zugriff: 16.06.2017
- [Thorlabs 2017b] THORLABS: *Thorlabs Online S120C*. 2017. – URL <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=S120C>. – Online-Zugriff: 16.06.2017
- [Urban 2005] URBAN, Philipp: *Metamere und multispektrale Methoden zur Reproduktion farbiger Vorlagen*. BoD–Books on Demand, 2005
- [VDI/VDE 2002] VDI/VDE: *VDI/VDE 2634 Blatt 1: Optische 3D-Messsysteme Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung*. 05 2002
- [VDI/VDE 2008] VDI/VDE: *VDI/VDE 2634 Blatt 3: Optische 3D-Messsysteme Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten*. 12 2008
- [VDI/VDE 2012] VDI/VDE: *VDI/VDE 2634 Blatt 2: Optische 3D-Messsysteme Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung*. 08 2012
- [VDMA 2016] VDMA: *Key Technology for Automation Solutions Machine Vision 2017/18 Applications - Products - Suppliers*. Online. 2016
- [Vilaseca u. a. 2008] VILASECA, Meritxell ; MERCADAL, Rita ; PUJOL, Jaume ; ARJONA, Monserrat ; LASARTE, Marta de ; HUERTAS, Rafael ; MELGOSA, Manuel ; IMAI, Francisco H.: Characterization of the human iris spectral reflectance with a multispectral imaging system. In: *Applied optics* 47 (2008), Nr. 30, S. 5622–5630
- [Waltham 2013] WALTHAM, Nick: CCD and CMOS sensors. In: *Observing Photons in Space*. Springer, 2013, S. 423–442
- [Wheatstone 1838] WHEATSTONE, Charles: Contributions to the physiology of vision.–Part the first. On some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision. In: *Philosophical transactions of the Royal Society of London* (1838), S. 371–394
- [Wright 1930] WRIGHT, WD: A re-determination of the mixture curves of the spectrum. In: *Transactions of the Optical Society* 31 (1930), Nr. 4, S. 201
- [Wu und Sun 2013a] WU, Di ; SUN, Da-Wen: Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review - Part I: Fundamentals. In: *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 19 (2013), S. 1–14
- [Wu und Sun 2013b] WU, Di ; SUN, Da-Wen: Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: a review - part II: applications. In: *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 19 (2013), S. 15–28

-
- [Wu und Sun 2013c] WU, Di ; SUN, Da-Wen: Colour measurements by computer vision for food quality control—A review. In: *Trends in Food Science & Technology* 29 (2013), Nr. 1, S. 5–20
- [Wyant 2002] WYANT, James C.: White light interferometry. In: *AeroSense 2002* International Society for Optics and Photonics (Veranst.), 2002, S. 98–107
- [Wyble und Rich 2007a] WYBLE, David R. ; RICH, Danny C.: Evaluation of methods for verifying the performance of color-measuring instruments. Part I: Repeatability. In: *Color Research & Application* 32 (2007), Nr. 3, S. 166–175
- [Wyble und Rich 2007b] WYBLE, David R. ; RICH, Danny C.: Evaluation of methods for verifying the performance of color-measuring instruments. Part II: Inter-instrument reproducibility. In: *Color Research & Application* 32 (2007), Nr. 3, S. 176–194
- [Yang 2012] YANG, Qingxiong: A non-local cost aggregation method for stereo matching. In: *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on* IEEE (Veranst.), 2012, S. 1402–1409
- [Ye u. a. 2000] YE, QZ ; ONG, SH ; HAN, X: A stereo vision system for the inspection of IC bonding wires. In: *International Journal of Imaging Systems and Technology* 11 (2000), Nr. 4, S. 254–262

Beiträge zu Veröffentlichungen

- [Beck u. a. 2017] BECK, M ; KLAMMER, M ; ROUSSEAU, I ; OBERGFELL, M ; LEIDERER, P ; HELM, M ; KABANOV, VV ; DIAMANT, I ; RABINOWICZ, A ; DAGAN, Y ; DEMSAR, J: Energy dependence of the electron-boson coupling strength in the electron-doped cuprate superconductor $Pr_{1.85}Ce_{0.15}CuO_{4-\delta}$. In: *Physical Review B* 95 (2017), Nr. 8, S. 085106
- [Beck u. a. 2011] BECK, Matthias ; KLAMMER, M ; LANG, S ; LEIDERER, Paul ; KABANOV, Viktor V. ; GOŁTSMAN, GN ; DEMSAR, Jure: Energy-gap dynamics of superconducting NbN thin films studied by time-resolved terahertz spectroscopy. In: *Physical review letters* 107 (2011), Nr. 17, S. 177007
- [Dierl u. a. 2016] DIERL, Marcel ; ECKHARD, Timo ; FREI, Bernhard ; KLAMMER, Maximilian ; EICHSTÄDT, Sascha ; ELSTER, Clemens: Improved estimation of reflectance spectra by utilizing prior knowledge. In: *JOSA A* 33 (2016), Nr. 7, S. 1370–1376
- [Eckhard u. a. 2014] ECKHARD, Timo ; KLAMMER, Maximilian ; VALERO, Eva M. ; HERNÁNDEZ-ANDRÉS, Javier: Improved spectral density measurement from estimated reflectance data with kernel ridge regression. In: *International Conference on Image and Signal Processing* Springer (Veranst.), 2014, S. 79–86
- [Godau u. a. 2013] GODAU, C ; KLAMMER, M ; ECKHARD, T ; SCHNITZLEIN, M ; NOWACK, D ; FREI, B ; URBAN, P: Evaluation of a multi-spectral camera system for inline color measurement. In: *Annual meeting of the German Colour Group*, 2013
-